Geologian tutkimuskeskus

2021

Digitalisaatio ja luonnonvarat

Toni Eerola (toim.), Pasi Eilu (toim.), Jyri Hanski, Susanna Horn, Jachym Judl, Marjaana Karhu, Päivi Kivikytö-Reponen, Panu Lintinen ja Bo Långbacka

GTK:n tutkimustyöraportti 53/2021

GEOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS

Tutkimustyöraportti 53/2021

Toni Eerola (toim.), Pasi Eilu (toim.), Jyri Hanski, Susanna Horn, Jachym Judl, Marjaana Karhu, Päivi Kivikytö-Reponen, Panu Lintinen ja Bo Långbacka

Digitalisaatio ja luonnonvarat

Ne kuvat, joissa ei mainita tekijää, ovat raportin kirjoittajien tekemiä.

Kansikuva: Kalliopaljastuman dokumentointi kännykkäkameralla. Kuva: GTK.

Toni Eerola (GTK), Pasi Eilu (GTK), Jyri Hanski (VTT), Susanna Horn (SYKE), Jachym Judl (SYKE), Marjaana Karhu (VTT), Päivi Kivikytö-Reponen (VTT), Panu Lintinen (GTK) ja Bo Långbacka (GTK)

Taitto: Elvi Turtiainen Oy

Espoo 2021

Eerola, T. (toim.), Eilu, P. (toim.), Hanski, J., Horn, S., Judl, J., Karhu, M., Kivikytö-Reponen, P., Lintinen, P. & Långbacka, B. 2021. Digitalisaatio ja luonnonvarat. *Geologian tutkimuskeskus, Tutkimustyöraportti 53/2021,* 92 sivua, 16 kuvaa, 17 taulukkoa ja 1 liite.

Raportti käsittelee digitalisaatiossa tarvittavia mineraaliluonnonvaroja. Digitaalisten sovellusten ja digitaalisten laitteiden käyttö lisääntyy jatkuvasti, ja yhä uutta tietoa muunnetaan digitaaliseen muotoon. Aiempi tutkimus digitalisaatiosta vastuullisuuden näkökulmasta on painottunut energiankulutukseen ja päästöihin. Koska ICT-laitteiden kysyntä useissa nyky-yhteiskunnan käyttökohteissa kuitenkin kasvaa jatkuvasti, digitaalisten laitteiden raaka-ainevaatimuksista on tullut vastuullisuuden kannalta ratkaiseva kysymys. Siksi tässä raportissa syvennytäänkin digitalisaation raaka-ainekulutukseen. Keskitymme seuraaviin haasteisiin ja aiheisiin:

- Digitalisaation raaka-aineiden lähteet, tuotanto, saatavuus ja vastuullisuus
- ICT-sektorin raaka-aineiden kulutus, painopisteenä valikoidut keskeiset loppukäyttäjälaitteet: älypuhelin ja älytelevisio
- Keskeiset näkökulmat ICT-alan arvoketjuun
- Keskeiset näkökulmat ICT-alan kuluttajiin ja loppukäyttäjiin
- Mahdolliset ratkaisut, joilla digitaalisten laitteiden vastuullisuutta voidaan tukea niiden elinkaaren aikana
- Keskeiset poliittiset näkökulmat sekä suositukset

Asiasanat: digitalisaatio, raaka-aineet, metallit, mineraalit, kaivosteollisuus, vastuullisuus, kestävä kehitys, kestävyys, yritysten yhteiskuntavastuu, ympäristövaikutukset, ICT, matkapuhelimet, älytelevisiot, kierrätys, kiertotalous, kunnostus

Toni Eerola
Geologian tutkimuskeskus
PL 96
02151 Espoo

Sähköposti: toni.eerola@gtk.fi

Pasi Eilu
Geologian tutkimuskeskus
PL 96
02151 Espoo

Sähköposti: pasi.eilu@gtk.fi

Tutkimusprojektin rahoittajana on toiminut Suomen itsenäisyyden juhlarahasto Sitra. Projekti on osa Sitran kestävyysratkaisut-teeman työtä, jonka tavoitteena on vahvistaa luonnon monimuotoisuutta ja vauhdittaa ekologista jälleenrakentamista.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ 2

SANASTO JA LYHENTEET 8

JOHDANTO 11

1 DIGITALISAATIO – KOKONAISKUVA 13
1.1 Digitalisaation erilaiset roolit 13
1.2 Keskeiset digitaaliset teknologiat 15
1.3 Digitaalinen talous 16
1.3.1 ICT-sektori 17
1.3.2 ICT-laitteet 17
1.4 ICT-laitteiden arvoketju 18
1.4.1 Primääri- eli neitseelliset raaka-aineet ja uusioraaka-aineet 18
1.4.2 Suunnittelu 19
1.4.3 ICT-markkina ja sen toimijat 20
1.4.4 Käyttövaihe ja käyttöiän pidentäminen 22
1.4.5 Kierrätys ja sähkö- ja elektroniikkalaiteromu 22

2 MINERAALIT JA METALLIT DIGITALISAATIOSSA 23
2.1 Nykykäyttö ja raaka-aineiden tuotanto digitalisaatiossa 29
2.1.1 Teknologiakriittiset metallit 29
2.1.2 Akkumineraalit 30
2.1.3 Muut metallit 30
2.2 EU digitalisaation vaatimien luonnonvarojen tuotanto ja kysyntä globaalissa kontekstissa 31
2.2.1 EU:n mineraalipolitiikka 33
2.2.2 Suomi 34
2.3 Digitalisaation primaariraaka-aineiden tuotannon vastuullisuus 39

3 TAPAUSESIMERKKEJÄ – ÄLYPUHELIN JA ÄLYTELEVISIO 44
3.1 Pääkomponentit 44
3.1.1 Älypuhelin 44
3.1.2 Älytelevisio 45
3.2 Arvoketju ja keskeiset toimijat 46
3.2.1 Älypuhelin 46
3.2.2 Älytelevisio 49
3.3 Pääelementit ja raaka-ainekoostumus 51
3.3.1 Älypuhelin 51
3.3.2 Älytelevisio 56
3.4 Suunnittelu 58
3.4.1 Älypuhelin 60
3.4.2 Älytelevisio 61

3.5 Hankinta, käyttö ja käyttöiän pidentäminen ... 61
3.5.1 Älypuhelin ... 62
3.5.2 Älytelevisio ... 63
3.6 Kierrätys ... 64
3.6.1 Kierrätyksen mahdollistajia ja haasteita ... 64
3.6.2 ICT-raaka-aineiden kierrätysasteet ... 65
3.6.3 Älypuhelin ... 70
3.6.4 Älytelevisio ... 72
3.6.5 Älypuhelinten kierrätyksen mahdollistajia ja haasteita ... 72
3.7 Haastattelut ... 72

4 HAASTEITA JA SUOSITUKSIA ... 76
4.1 Elektronisten laitteiden raaka-aineet ... 76
4.2 Huoltovarmuus ... 77
4.3 Elinkaaren pituus ... 79
4.4 Hankinta ja käyttö ... 80
4.5 Sähkö- ja elektroniikkaromu ja kierrätys ... 81

5 JOHTOPÄÄTÖKSET ... 82
5.1 Tarvitaan järjestelmätason suunnittelua, kestävää kulutusta, vastuullisia tuotantoprosesseja sekä kiertäviä materiaalivirtoja ... 82

Jatkotutkimusaiheita ... 85

LÄHDE- JA KIRJALLISUUSLUETTELO ... 86

LIITE 1 ... 93

TIIVISTELMÄ

Digitalisaatio on **muutostrendi**, jossa informaatiosta luodaan arvoa digitaalisten teknologioiden avulla. Se on muovannut työmarkkinoita, antanut yksilöille valtaa ja mahdollistanut ekologisesti kestävien, planeettamme kantokykyä vastaavien talous- ja yhteiskuntajärjestelmien luomisen, ja tulee tekemään näitä kaikkia myös jatkossa. Se on myös **arvokas talouden sektori**. Digitaalisen transformaation arvo yhteiskunnalle ja teollisuudelle ylittää 80 biljoonaa euroa vuoteen 2025 mennessä. EU-alueella tieto- ja viestintäteknologiasektori (ICT-sektori) työllisti 5,4 miljoonaa ihmistä vuonna 2017. Digitaalisen talouden arvo tuotetaan kuitenkin pääasiassa vain muutamissa maissa.

Digitalisaatio on myös merkittävä **päästöjen lähde ja suuri energiankuluttaja**. Digitaalisen talouden globaalit kasvihuonekaasupäästöt muodostavat arviolta 2,6–5 % kokonaispäästöistä. Euroopan eri maissa energian kokonaiskäyttö muodostaa arviolta 0,5–6,4 % maan BKT:stä, ja digitaalisen talouden energiankulutuksen arvioidaan muodostavan 5,4–8 % energian kokonaiskulutuksesta.

Digitalisaatio on **yksi kriittisten raaka-aineiden kuluttajista, ja se kilpailee samoista mineraaleista uusiutuvan energian, sähköisen liikkuvuuden ja muiden vastaavien sektorien kanssa**. Digitaalinen teollisuus käyttää moniin tarkoituksiin suurta määrää erilaisia raaka-aineita jatkuvasti kasvavan laitevalikoiman valmistamiseen. Samoja kriittisiä raaka-aineita tarvitaan myös ICT-infrastruktuuriin. Suurin osa ICT-metalleista ja -mineraaleista tuotetaan Kiinassa tai Afrikassa ja kuljetetaan pitkien matkojen päähän. **ICT-, viihde- ja mediasektorit kuluttavat yhteensä noin 0,5 % raaka-aineista (painon mukaan mitattuna)**. Joidenkin raaka-aineiden, kuten indiumin, galliumin ja germaniumin, osalta digitaalinen talous kuitenkin vastaa 80–90 %:a kokonaiskulutuksesta. Tästä saattaa joissakin ICT-raaka-aineissa aiheutua ongelmia lähitulevaisuudessa, sillä samoja raaka-aineita tullaan todennäköisesti tarvitsemaan myös siirryttäessä vihreään energiaan (esim. aurinkopaneeleissa ja tuulivoimaloissa). Jos raaka-aineiden käyttöä ei ohjata sääntelyllä, talous ja hinnat tulevat lopulta ratkaisemaan, mikä sektori pystyy maksamaan näistä kilpailluista mineraaleista korkeimman hinnan.

Kielteisistä vaikutuksistaan huolimatta digitalisaatiolla on ratkaiseva rooli, kun halutaan **vähentää ympäristövaikutuksia muilla sektoreilla.** Digitalisaation ansiosta muut sektorit voivat käyttää energiaa ja raaka-aineita tehokkaammin ja siten parantaa ympäristötehokkuuttaan. Sellaista tutkimusdataa ei kuitenkaan ole, jolla voitaisiin tunnistaa, ovatko ICT-käytön kokonaisympäristöhyödyt suurempia kuin ICT-sektorin aiheuttamat ympäristövaikutukset.

Älypuhelinten ja älytelevisioiden kaltaisilla digitaalisilla laitteilla on **yleensä lyhyt elinkaari**. Joskus ne on jopa suunniteltu vanhenemaan ennen aikojaan eli siten, että niiden elinkaari jää tarkoituksella lyhyeksi. Lisäksi jos laite menee rikki, sitä ei voida korjata tai korjaus voi tulla yhtä kalliiksi kuin uusi laite. Siksi kuluttaja usein hankkii uuden laitteen ja vanha jää kotiin tai heitetään pois. Tämä tarkoittaa sitä, että arvokkaat raaka-aineet menetetään laitteen lyhyen käyttöiän jälkeen. Vaikka laitteet tuotaisiinkin kierrätykseen, kaikkia metalleja ei tällä hetkellä pystytä ottamaan talteen joko teknologian puuttumisen, korkeiden kustannusten tai suuren energiankulutuksen vuoksi.

Mineraaliraaka-aineet ovat muodostuneet maapallon historian aikana monimutkaisissa prosesseissa ja sopivissa olosuhteissa usein **miljoonia, jopa miljardeja vuosia sitten**. Jotta mineraaliesiintymiä on päästy tutkimaan ja hyödyntämään, on tarvittu merkittävää eroosiota. Malminetsintä vie aikaa, ja vain harva löydetyistä esiintymistä päätyy kaivokseksi asti. Tähän vaikuttavat esimerkiksi pitoisuus, määrä, sijainti, infrastruktuuri, markkinahinnat, kysyntä, kaivostoiminnan hyväksyntä jne. Suunnitellun kaivoksen rakentaminen vaatii valtavasti aikaa, työtä ja investointeja. Kun geologisia prosesseja, mineraalien syntymiseen ja hyödyntämiseen tarvittua aikaa verrataan niiden lyhyeen käyttöikään ja menetettyihin luonnonvaroihin,

tilanne vaikuttaa kestämättömältä, varsinkin kun otetaan huomioon materiaalien hyödylliset ominaisuudet ja potentiaalisesti loppumaton kierrätys.

Yhteiskunnan tarvitsemat mineraaliraaka-aineet **tuotetaan louhinta- ja jalostusprosessien kautta ja pienemmissä määrin kierrättämällä**. Primaariraaka-aineet (louhimalla saadut) prosessoidaan materiaaleiksi ja komponenteiksi, joista sitten valmistetaan laitteita. Materiaalien prosessointimenetelmiä on lukuisia, ja näiden menetelmien energia- ja materiaalitehokkuutta kehitetään jatkuvasti esimerkiksi älykkäiden teknologioiden kautta. Materiaaleista valmistetaan edelleen komponentteja ja laitteita. Jos raaka-aineiden louhintaa ja jalostamista ei hoideta asianmukaisesti ja vastuullisesti, prosessit voivat aiheuttaa huomattavia haittavaikutuksia ympäristölle ja paikallisille yhteisöille. Kaivostoiminta voi myös kilpailla muiden maankäyttötapojen ja elinkeinojen kanssa ja siten synnyttää konflikteja. Siksi malminetsinnän ja kaivostoiminnan vastuullisuutta pitäisi kehittää, varsinkin jos EU:ssa tavoitellaan korkeampaa raaka-ainetuotannon omavaraisuustasoa.

Kiertotalouden periaatteiden mukaisesti **laitteiden ja komponenttien tulisi olla korjattavia ja kierrätettäviä**. Kierrätettyjä materiaaleja tulisi käyttää mahdollisimman paljon, ja laitteiden elinkaarta tulisi pidentää. Metalleilla on onneksi paljon erinomaisia ominaisuuksia: ne ovat kestäviä ja metallimateriaaleja voidaan yleensä korjata, ottaa talteen ja kierrättää esim. pyro- tai hydrometallurgisilla prosesseilla. Metalleja voidaan pitää ikuisina materiaaleina, joita on periaatteessa mahdollista kierrättää loputtomasti ilman, että niiden ominaisuudet tai suorituskyky menetetään. ICT-laitteilla tämän loputtoman kierron saavuttamisessa on merkittäviä haasteita. **Useita raaka-aineita käytetään pieniä määriä ja kompleksisissa metalliseoksissa**, joten metallien talteenotto ja kierrättäminen on kallista, energiaa tai resursseja kuluttavaa tai jopa mahdotonta. Siksi laitteiden keräys-, talteenotto- ja kierrätysprosesseja on kehitettävä. Valtavia määriä sähkö- ja elektroniikkalaiteromua myös kuljetetaan kehittyviin maihin, joissa jätteen käsittelyolosuhteista ei ole mitään takuita. Aidossa kiertotaloudessa vastuullisuus otetaan huomioon koko laitteiden elinkaaren ajan, niin malminetsinnässä, tuotannossa, uudelleenkäytössä kuin kierrätyksessäkin. Tämä vaatii muutoksia kaikilta arvoketjun toimijoilta, mutta ensisijaisen tärkeää on kohdistaa toimet koko elinkaaren vastuullisuuteen eikä tavoitella toimijakohtaista yhden osa-alueen optimointia.

Laitteiden kiertoa ja vastuullisuutta voidaan kehittää ottamalla nämä näkökohdat huomioon jo aivan elinkaaren alkuvaiheessa, **varsinkin suunnittelu- ja materiaalikehitysvaiheessa**. Itse asiassa 80 % laitteen elinkaarivaikutuksista määräytyy jo suunnitteluvaiheessa. Tuotantoketjun alkupään volyymin ja raaka-aineiden määrän tarpeeseen voidaan vaikuttaa suunnitteluvalinnoilla. Suunnitteluvalinnoilla voidaan tukea myös elinkaaren pidentämistä tuotantoketjun loppupäässä ja parantaa materiaalien kiertoa. ICT-laitteiden koko elinkaaren vastuullisuutta voidaan tukea useilla tavoilla. Liikkeelle voi lähteä esimerkiksi materiaalisuunnittelun painopisteistä. Pyritään siis korvaamaan nykyiset, vaikeasti kierrätettävät ja myrkylliset komposiittimateriaalit ja seokset, ajatellaan materiaaleja, seoksia ja komponentteja uudella, niiden korjattavuutta painottavalla tavalla ja mietitään kierrätettyjen materiaalien käyttöä. Suunnittelun kautta voidaan myös kehittää ja ylläpitää **digitaalisia passeja**, joilla tuotteita voidaan seurata koko niiden elinkaaren ajan. Nämä passit voivat tukea ja vahvistaa kierrätysvaihtoehtoja ja design for X -lähestymistapoja. Voidaan esimerkiksi hyödyntää laitteiden tai komponenttien uudelleenkäyttö- tai korjausmahdollisuuksia ennemmin kuin materiaalien kierrätystä. Materiaalien ja seosten korvaaminen toisilla voidaan nähdä ratkaisuna, jolla vähennetään kriittisten raaka-aineiden kysyntää ja raaka-aineiden saantiriskiä. Näitä näkökulmia tulisi kuitenkin arvioida järjestelmän tasolla, jotta ymmärretään tuotteen elinkaaren aikaisten ja muualla arvoketjussa tehtyjen suunnitteluvalintojen laajemmat vaikutukset.

Kulutusyhteiskunnan markkinatalous perustuu rajattomalle talouskasvulle. Kysymys on kriittinen: teollisuus kehittää jatkuvasti uusia malleja ja ominaisuuksia ja tuottaa suuria määriä erilaisiin tarkoituksiin soveltuvia laitteita, joita yhteiskunta ei välttämättä edes tarvitse. Uusia tarpeita luodaan, jotta valtaviksi kasvaneet ja valtaa saaneet digiyhtiöt voivat kasvattaa tulostaan ja kannattavuuttaan. Ja vaikka erilaiset yhteiskunnalliset toimijat keskustelevat vastuullisuuskysymyksistä yhä enemmän, se ei ole vielä näkynyt riittävästi globaaleissa vaatimuksissa. Vastaava epäsuhta on nähtävissä myös kuluttajapuolella. Vaikka kuluttajat ovat jatkuvasti tietoisempia siitä, että vastuullisuushaasteisiin on vastattava nopeasti, näitä kysymyksiä on vaikeaa muuttaa aidoiksi teoiksi. Myös yritysten teot laahaavat jäljessä. Haastattelut kertovat, että ostopäätökseen vaikuttavat eniten tuotemerkki, suorituskyky ja hinta. Joissain

tapauksissa myös laitteiden pitkäikäisyys, korjattavuus ja päivitettävyys vaikuttivat päätökseen, millä voi olla myönteisiä vaikutuksia kiertotalouden, vastuullisuuden ja raaka-aineiden käytön kannalta. Tietoisuus vastuullisuuskysymyksistä kasvaa, ja vastuullisuudesta viestivien erilaisten merkintöjen käyttöä pidetään mahdollisena työkaluna, kun halutaan vahvistaa kuluttajan kykyä vastuullisten valintojen tekemiseen.

Kuluttajilla, päätöksentekijöillä, valtioilla ja teollisuudella on siis tärkeä rooli digitaalisten raaka-aineiden tuotannon ja digitaalisten tuotteiden suunnittelun muuttamisessa vastuullisemmaksi. Tässä raportissa erityisesti suositellaan tuotteiden ja raaka-aineiden elinkaaren pidentämistä ja siirtymistä kohti kiertotaloutta. Avainkysymys päätöksentekijöille kuuluu: ”Miten hyödyntää digitalisaation tarjoamia mahdollisuuksia ympäristön, yhteiskunnan ja talouden kannalta vastuullisella tavalla?”

ICT-alan raaka-aineiden päähaasteet ovat siis seuraavat:

- Kulutuksen kasvu esim. markkinoinnin, vaurastumisen ja jatkuvan tuotekehittelyn seurauksena
- Raaka-aineiden kasvava tarve ja niiden käytön vaikutukset
- Kriittisten- ja konfliktimineraalien käyttö
- Kilpailu muiden teollisuuden sektorien kanssa (sähköinen liikkuvuus, uusiutuva energia)
- ICT-tuotteiden lyhyt elinkaari
- Epäsuhta ICT-raaka-aineiden syntymiseen, etsintään ja tuotantoon kuluvan ajan ja käytön välillä
- ICT-tuotteiden monimutkaistuminen: tarvittavien raaka-aineiden kasvava kirjo, entistä monimutkaisemmat raaka-aineseokset
- ICT-tuotteiden kompleksisuus tekee niiden kierrätyksestä haastavaa
- Tuonnista riippuvaisuus, toimitusvarmuus (laitteet, komponentit ja raaka-aineet)

Mahdollisia ratkaisuja:

- Ekosuunnittelu: materiaali- ja tuotesuunnittelu
- Jäljitettävyyden sekä digitaalisten materiaali- ja tuotepassien kehittäminen
- Kierrätyksen optimoiminen
- Uudet kiertotalouden mukaiset jakamisen ja omistamisen mallit
- Kasvava omavaraisuus EU:n sisäisissä toimitusketjuissa
- Kulutuksen vähentäminen ymmärryksen lisäämisen, sekä kannustimien ja lainsäädännön kautta
- Siirtymä materiaalien kulutuksesta ja tuotannosta palveluihin

Haasteita:

- Kulutuksen kasvu
- Kasvava raaka-aineiden tarve
- Kriittisten ja konfliktimineraalien käyttö
- Kilpailu muiden teollisuuden sektorien kanssa (sähköinen liikkuvuus, uusiutuva energia)
- ICT-tuotteiden lyhyt elinkaari
- Epäsuhta ICT-raaka-aineiden syntymiseen, etsintään ja tuotantoon kuluvan ajan ja käytön välillä
- ICT-tuotteiden monimutkaistuminen: tarvittavien raaka-aineiden kasvava kirjo, entistä monimutkaisemmat raaka-aineseokset
- ICT-tuotteiden kompleksisuus tekee niiden kierrätyksestä haastavaa
- Tuonnista riippuvaisuus, toimitusvarmuus, kriittiset ja konfliktimineraalit (laitteet, komponentit ja raaka-aineet)

Ratkaisuja:

- Ekologinen suunnittelu materiaalin ja tuotteen tasolla
- Jäljitettävyyden sekä digitaalisten materiaali- ja tuotepassien kehittäminen
- Kierrätyksen optimoiminen
- Uudet ja enemmän kiertotalouden mukaiset jakamisen ja omistamisen mallit
- Kasvava omavaraisuus EU:n sisäisistä vastuullisista toimitusketjuista
- Kulutuksen vähentäminen kasvavan tietoisuuden, erilaisten kannustimien ja lainsäädännön kautta
- Siirtymä materiaalien kulutuksesta ja tuotannosta palveluihin

Aiempi tutkimus digitalisaatiosta vastuullisuuden näkökulmasta on painottunut energiankulutukseen ja kasvihuonekaasupäästöihin. Koska ICT-laitteiden kysyntä useissa nyky-yhteiskunnan käyttökohteissa kuitenkin kasvaa jatkuvasti, digitaalisten laitteiden raaka-ainevaatimuksista on tullut vastuullisuuden kannalta ratkaiseva kysymys. Siksi tässä raportissa syvennytäänkin digitalisaation raaka-ainekulutukseen. Keskitymme seuraaviin haasteisiin ja aiheisiin:

- Digitalisaation raaka-aineiden lähteet, tuotanto, saatavuus ja vastuullisuus
- ICT-sektorin raaka-aineiden kulutus, painopisteenä valikoidut keskeiset loppukäyttäjälaitteet: älypuhelin ja älytelevisio
- Keskeiset näkökulmat ICT-alan arvoketjuun
- Keskeiset näkökulmat ICT-alan kuluttajiin ja loppukäyttäjiin
- Mahdolliset ratkaisut, joilla digitaalisten laitteiden vastuullisuutta voidaan parantaa niiden elinkaaren aikana
- Keskeiset poliittiset näkökulmat sekä suositukset

SANASTO JA LYHENTEET

Akkumetallit = Akuissa usein käytetyt metallit tai mineraalit. Koskee varsinkin litiumioniakkuja, jotka ovat ratkaisevan tärkeitä kannettavissa kahdensuuntaisissa viestintävälineissä ja tietojenkäsittelylaitteissa. Akun katodina käytetään litiumia, kobolttia, nikkeliä, mangaania ja alumiinia ja anodina pääasiassa grafiittia. Jonkin verran litiumia käytetään myös elektrolyytissä. Samat metallit ja mineraalit ovat suurilta osin tärkeitä myös sähköisten kulkuneuvojen akuissa. Akkujen kokoonpanossa on kuitenkin eroa, sillä sähköautoissa tilaa on enemmän ja pientä kokoa tärkeämpää on akun pitkä käyttöaika (Buchman 2021).

Digitalisaatio = Digitalisaatio viittaa tapoihin, joilla digitaaliset teknologiat muuttavat liiketoimintamalleja, synnyttävät uutta liikevaihtoa ja luovat arvoa. Digitalisaatiota ei saa sekoittaa samankaltaisiin termeihin, ”digitointiin” ja ”digitalisointiin”, joita käytetään, kun analogiset prosessit muutetaan digitaaliseen muotoon muuttamatta itse prosessia millään tavalla. (Gartner, 2021)

Digitaalinen transformaatio = Digitaalinen transformaatio voidaan tulkita useilla tavoilla, ja se voi tarkoittaa IT:n nykyaikaistamista (esim. pilvipalveluita), digitaalista optimointia ja uusien digitaalisten liiketoimintamallien keksimistä. Digitaalisesta transformaatiosta puhutaan usein julkisen sektorin organisaatioiden hankkeissa, joissa siirretään palveluita verkkoon tai nykyaikaistetaan järjestelmiä. Tässä yhteydessä termi on lähempänä ”digitointia” kuin ”liiketoiminnan digitaalista transformaatiota” (Gartner 2021). Digitaalinen transformaatio kattaa sekä digitaalisten teknologioiden integroinnin yritystoimintaan että uusien teknologioiden yhteiskuntavaikutukset (European Parliamentary Research Service 2019).

Digitaalinen disruptio = Digitaalisten mahdollisuuksien, kanavien tai omaisuuden aiheuttama tai niiden kautta ilmaistava vaikutus, joka muuttaa kulttuurin, markkinoiden, teollisuuden tai prosessin perusodotuksia ja -tottumuksia.” (Gartner 2021)

Digitaalinen talous = Digitaalinen talous koostuu kolmesta kerroksesta: tieto- ja viestintäteknologian (ICT) sektorista, digitaalisesta taloudesta ja digitalisoidusta taloudesta (Bukht & Heeks 2018).

Digitaaliset teknologiat = Sähköiset työkalut, järjestelmät, laitteet ja resurssit, jotka luovat, varastoivat tai käsittelevät dataa. Näitä ovat esimerkiksi esineiden internet (IoT), pilvipalvelut, tekoäly, kehittynyt robotiikka, innovatiiviset digitaaliset alustat ja lohkoketjuteknologiat (European Parliamentary Research Service 2019).

EcoCAD = Tietokoneavusteinen suunnittelutyökalu, joka integroi ympäristökriteerit suunnittelu-vaiheeseen.

EIP = European Innovation Partnership eli eurooppalainen innovaatiokumppanuus.

Esineiden internet (Internet of Things eli IoT) = Kuvaa verkostoa, jossa fyysiset kohteet eli esineet ovat antureiden, ohjelmistojen ja muiden teknologioiden avulla internetin välityksellä yhteydessä toisiin laitteisiin ja järjestelmiin ja vaihtavat tietoja niiden kanssa.

Elinkaariarviointi (Life Cycle Assessment eli LCA) = Tuotteiden ja palveluiden elinkaaren aikaisten panosten, tuotosten ja ympäristövaikutusten kokoaminen ja arviointi.

Harvinaiset maametallit (REE) = Ryhmä kemiallisesti toisiaan muistuttavia metalleja, joita kutsutaan myös lantanoideiksi: lantaani, cerium, praseodyymi, neodyymi, samarium, europium, gadolinium, terbium, dyprosium, holmium, erbium, ytterbium, lutetium ja yttrium.

Hiilijalanjälki = Tuotteen, toiminnan tai palvelun aiheuttama ilmastokuorma, eli kuinka paljon kasvihuonekaasuja sen koko elinkaaren aikana syntyy.

HSC Sim = Prosessimallinnus ja -simulaatio-ohjelmisto kaivos- ja prosessointiteknologioiden suunnitteluun. Sisältää integroidun LCA-moduulin.

Korkean teknologian metallit (high-tech-metallit) = Alkuaineet, jotka ovat välttämättömiä nykyaikaisten kehittyneiden teknologioiden kannalta. Näitä metalleja ovat esimerkiksi gallium, germanium, niobium, harvinaiset maametallit ja tantaali, ja ne ovat keskeisessä roolissa, kun kehitetään nousevia avainteknologioita, myös uusiutuvaa energiaa, energiatehokkuutta, elektroniikkaa tai avaruusteollisuutta. Näitä metalleja esiintyy maankuoressa yleensä vain pienissä tai hivenpitoisuuksissa. Niiden esiintymisen keskimäärä vaihtelee < 0,1 miljardisosasta (1 miljardisosa = 1 ppb = 0,0000001 %) useaan sataan miljoonasosaan (1 miljoonasosa = 1 ppm = 0,0001 %), ja niitä tuotetaan yleensä, mutta ei aina, vain harvoista mineraaliesiintymistä.

ICT-laitteet = ICT-laitteilla tarkoitetaan kaikkia tietokoneiden ja niihin liittyvien laitteiden fyysisiä osia. Termi kattaa esimerkiksi käyttäjälaitteet (älypuhelimet ja tabletit, reitittimet, modeemit, kannettavat ja pöytätietokoneet ja julkiset näytöt), viihde- ja medialaitteet (TV:t ja muu viihde-elektroniikka), liityntäverkot (kiinteä ja mobiililaajakaista), yritysverkot ja datakeskukset (Malmodin & Lundén 2018).

Kriittiset raaka-aineet (Critical raw material eli CRM)
Raaka-aine, jolla on suuri taloudellinen merkitys ja jonka saatavuuteen liittyy paljon riskejä (Blengini ja muut 2020). EU on koonnut näistä listan, jota se myös päivittää säännöllisesti. Ensimmäinen lista, jossa oli 14 kriittistä raaka-ainetta, julkaistiin vuonna 2011. Seuraava tarkastettu, 20 CRM:n lista julkaistiin vuonna 2014, kolmas 27 CRM:n lista vuonna 2017 ja neljäs 30 CRM:n lista vuonna 2020 (vuoden 2020 listaa varten arvioitiin 83 yksittäistä raaka-ainetta; European Commission 2020c).

Käyttöikä = Aika, jonka kuluttaja voi tuotetta käyttää.

Käyttöiän loppu = Tuotteen elinkaaren loppu.

Malmivarat = Mineraalivarantojen osa, jonka koko tunnetaan ja jota voidaan hyödyntää voitollisesti. Epätaloudelliset mineraalivarannot voivat koska tahansa muuttua malmivaraksi, jos raaka-aineiden hinnoissa tai mineraalipolitiikassa tapahtuu muutoksia tai mineraalien louhintateknologia kehittyy. On tärkeää ymmärtää, että tämänhetkiset malmivarat ovat vain murto-osa kaikista tunnetuista ja vielä löytämättömistä mineraalivarannoista.

MECO-matriisi = Tuotepohjainen ympäristöarviointityökalu, joka keskittyy seuraaviin kategorioihin: materiaalit, energia, kemikaalit ja muut.

MET-matriisi = Tuotepohjainen ympäristöarviointityökalu, joka keskittyy seuraaviin kategorioihin: materiaalit, energia, myrkyllisyys.

Mineraaliesiintymä (”malmi”) = Taloudellisesti kiinnostavan materiaalin esiintymä maankuoressa, kun esiintymän muoto, laatu ja määrä ovat riittävät, jotta voidaan arvioida materiaalin louhinnan olevan mahdollisesti kannattavaa. Esiintymä, jonka koko ja pitoisuus ovat riittävät tekemään esiintymästä suotuisimmissa mahdollisissa olosuhteissa taloudellisesti kannattavan.

Mineraalivarannot = Se määrä geologista raaka-ainetta, jota mineraaliesiintymissä tiedetään olevan olemassa. Esiintymän sijainti, määrä, pitoisuus tai laatu sekä tiheys, muoto ja fyysiset ominaisuudet tunnetaan, arvioidaan tai tulkitaan tiettyjen geologisten todisteiden, näytteiden ja tietämyksen perusteella.

Piimetalli = Kemiallisen alkuaineen, piin (Si), puhdas metalloidimuoto.

Platinaryhmän metallit (PGM = PGE) = Platina, palladium, rodium, rutenium, iridium ja osmium

Primääriraaka-aineet = Neitseelliset raaka-aineet = Louhimalla saatavat mineraaliraaka-aineet.

Sosiaalinen toimilupa = Paikallisten yhteisöiden ja sidosryhmien tai laajemmin yhteiskunnan toiminnalle antama hyväksyntä. Termi on syntynyt kaivosteollisuudessa, mutta sen käyttö on levinnyt myös muille sellaisille sektoreille, joiden toiminta on riippuvainen maan käytöstä.

Suunniteltu vanheneminen = Fyysinen ja teknologinen vanheneminen. Koskee eri aiheita, kuten korjattavuuden puute, osien suunniteltu hajoaminen, esteettisen laadun väheneminen, suunnittelun vanheneminen ja yhteensopivuuden puute (esim. kun ohjelmistopäivitykset lakkaavat toimimasta).

Sähkö- ja elektroniikkalaitteet = Laitteet, joiden toiminta nojaa sähkövirtaan tai sähkömagneettisiin kenttiin, ja laitteet, jotka luovat, siirtävät ja mittaavat näitä virtoja ja kenttiä. Sähkö- ja elektroniikkalaitteet ovat tuotteita, joissa on virtapiiristö tai elektroniikkakomponentteja sekä virtalähde tai akku (STEP 2014, Forti ja muut 2020).

Sähkö- ja elektroniikkalaiteromu (SER) = ICT-laitteesta (tai sähkö- ja elektroniikkalaitteesta) tulee SER:a, kun omistaja heittää sen pois eikä aio käyttää sitä uudelleen (STEP 2014). SER kattaa kaikentyyppiset sähkö- ja elektroniikkalaitteet ja niiden osat niiden elinkaaren viimeisen vaiheen päätyttyä.

Tieto- ja viestintäteknologia (ICT) = Tietotekniikan (IT) laajennustermi, joka painottaa yhtenäisen viestinnän roolia ja televiestinnän (televiestintäverkot ja langattomat signaalit) ja tietokoneiden integrointia sekä ohjelmistoja, väliohjelmistoja, varastoja ja audiovisuaalisia laitteita, joiden avulla käyttäjät voivat käyttää, varastoida, välittää, ymmärtää ja muokata tietoja. ICT on kattotermi, joka kattaa kaikki viestintälaitteet, myös radion, television, matkapuhelimet, tietokone- ja verkkolaitteet ja satelliittijärjestelmät, sekä niihin kuuluvat lukuisat palvelut ja laitteet, kuten videokonferenssit ja etäopetuksen.

Tuotteen elinkaari = Tuotejärjestelmän peräkkäiset ja toisiinsa linkittyvät vaiheet raaka-aineen hankinnasta tai luonnonvarojen muodostumisesta tuotteen valmistukseen, käyttöön ja lopulliseen hävittämiseen tai tuotteen elinkaaren pidentymiseen.

Urbaani kaivostoiminta = Raaka-aineiden hankkiminen antropogeenisistä (tai teknogeenisistä) eli ihmisen luomista lähteistä, kuten kaupunkien ja teollisuuden jätteestä ja materiaalien sivuvirroista.

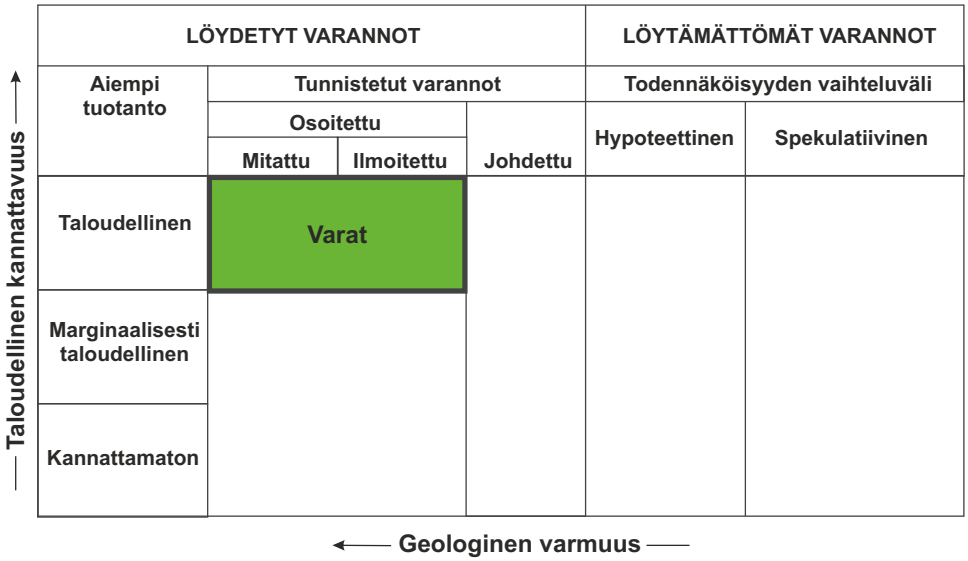
Uusioraaka-aineet = Raaka-aineet, joita saadaan kierrättämällä primääriraaka-aineita.

Yrityksen yhteiskuntavastuu (Corporate Social Responsibility eli CSR) = Vapaaehtoiset keinot, joilla lievennetään teollisen toiminnan negatiivisia vaikutuksia ja jotka ovat ympäristön, yhteiskunnan ja talouden vastuullisuutta edistävän lainsäädännön asettamaa perustasoa tiukempia (European Commission 2011).

JOHDANTO

Mineraaliesiintymät ovat muodostuneet miljoonia tai jopa miljardeja vuosia sitten erityisissä geologisissa prosesseissa ja olosuhteissa, jotka ovat olleet niiden syntymisen kannalta suotuisia. Tämä on usein tapahtunut syvällä maankuoressa. Tämän jälkeen on taas kulunut pitkä ajanjakso ja tapahtunut merkittävää eroosiota, jonka myötä mineraalit ovat tulleet esille tai ovat niin lähellä maanpintaa, että niitä voidaan tutkia ja hyödyntää. Tässä suhteessa luonto on oikukas: mineraaliesiintymiä ei ole kaikkialla, vaan vain tietyissä paikoissa, jotka on ensin löydettävä.

Mineraalien muodostumisesta oli kulunut pitkä aika, kun ihmiset oppivat käyttämään metalleja ja mineraalia erilaisiin tarkoituksiin. Moderni yhteiskunta kuluttaa ja tarvitsee valtavia määriä erilaisia mineraaliluonnonvaroja. Siksi geologit etsivät mineraaliesiintymiä kaikkialta maailmasta. He työskentelevät hyvin vaihtelevissa tilanteissa, olosuhteissa ja haasteissa, joita ei määritä vain geologia vaan myös sosiaalinen, taloudellinen ja poliittinen ympäristö. Useat geologit uurastavat koko uransa eivätkä silti löydä ainuttakaan merkittävää tai taloudellisesti kannattavaa mineraaliesiintymää. Mineraalien etsinnän keskimääräinen onnistumisaste onkin yksi tuhannesta. Tämä tarkoittaa sitä, että tuhannesta mineraaliesiintymän varalta tutkitusta kohteesta vain yhdestä saattaa tulla kaivos (Thomson & Joyce 1997, Moon & Evans 2006). Mineraaliesiintymän huolellinen tutkimus vie vuosia tai vuosikymmeniä, sillä siihen tarvitaan valtavia investointeja, ja jos kaivos päätetään rakentaa, lupaprosessi on pitkä. Alussa hyvin lupaavalta vaikuttava mineraaliesiintymä ei välttämättä täytä hyödyntämiskelpoisen esiintymän vaatimuksia. Syitä tähän voivat olla esimerkiksi syrjäinen sijainti, infrastruktuurin puute, raaka-ainemarkkinoiden muuttuva tilanne, rahoituksen puute, muut maankäyttötavat, poliittiset muutokset, elinkeinojen ja arvojen yhteensovittamattomuus tai paikallisen yhteisön kielteinen suhtautuminen. Mineraaliesiintymän louhinnan on oltava taloudellisesti perusteltua. Vain näin esiintymistä voi tulla tunnettuja ja hyödynnettäviä malmivaroja (Kuva 1). Kaivoksen on myös tuotettava omistajilleen voittoa ja aiheutettava mahdollisimman pientä haittaa ympäristölle ja paikallisille yhteisöille. Kasvava kysyntä ja hintojennousu voivat kuitenkin muuttaa tilannetta nopeasti. Näin käy yleensä raaka-ainebuumien aikana, jolloin myös kaivoskonfliktit lisääntyvät (Andrews ja muut 2017, Conde 2017). Kaivosteollisuuden vastuuta ympäristöä, yhteisöä ja paikallisia elinkeinoja kohtaan on siis parannettava minimoimalla teollisuuden haittavaikutukset.



Kuva 1. Mineraalivarantojen ja malmivarojen määritelmä (USGS 2021). Taloudellinen toteuttamiskelpoisuus kasvaa ylöspäin ja geologinen varmuus kasvaa vasemmalle. Vain taloudellisia esiintymiä eli varoja louhitaan. Hypoteettinen tarkoittaa tunnettujen mineraaliesiintymätyyppien vielä löytämättömiä varantoja sellaisissa geologisissa ympäristöissä, joissa tunnetaan muita hyvin tutkittuja saman mineraalityypin esiintymiä. Spekulatiiviset varannot voivat tarkoittaa joko tunnettujen esiintymätyyppien esiintymistä suotuisissa geologisissa ympäristöissä, joissa mineraalilöytöjä ei ole vielä tehty, tai sellaisia esiintymätyyppejä, joiden taloudellista potentiaalia ei ole vielä tunnistettu.

Arviot saatavilla olevista raaka-aineresursseista perustuvat nykytietoon sekä mineraaliesiintymiä tutkivien ja hyödyntävien yritysten raportointiin (Jowitt & McNulty 2021). Mineraaliesiintymät sisältävät mineraalivaroja, joita vallitsevissa olosuhteissa voidaan taloudellisesti hyödyntää (Kuva 1). Raportoidut metallit ja mineraalit eivät siis edusta kaikkia maapallon varoja: paljon on vielä löytämättä (Meinert ja muut 2016).

Mineraalit ovat nyky-yhteiskuntamme kiinteä perusta ja valmistusteollisuuden selkäranka. Itse asiassa niitä tarvitaan kaikilla talouden sektoreilla ja kaikissa palveluissa, ruoantuotanto mukaan lukien. Mineraaliesiintymien löytäminen ja uusien kaivosten perustaminen on yhä tarpeen, jotta voidaan ylläpitää minkä tahansa kansallisen talouden raaka-aineiden huoltovarmuutta. Vaikka useiden raaka-aineiden tapauksessa kierrätys on jo tärkeää ja selvästi kasvussa, uusien primääriraaka-aineiden tarvetta tämä ei poista (esim. Herrington 2021, IEA 2021). Malminetsintä ja louhinta ovat siis olennaisia yhteiskunnan tarpeiden kannalta.

Ensin mineraalit löydetään, sen jälkeen metallit otetaan talteen ja sitten siirrytään kohti moderneja materiaaleja. Materiaalitieteilijät kehittävät metalliseoksia, keramiikkaa ja akkukemikaaleja katodimateriaaleille sekä akkukennoja. Esimerkiksi tuotesuunnittelijat kehittävät kannettavia elektronisia laitteita vastaamaan loppukäyttäjän tarpeita. Toisin sanoen tuotantoprosessi ja -ketju on pitkä: kaivoksesta metalleiksi, metalleista materiaaleiksi, materiaaleista komponenteiksi ja komponenteista huipputeknisiksi tuotteiksi. Useita metalleja, kuten kuparia ja terästä (nikkeliä, kromia ja rautaa), käytetään yhteiskunnassamme vuosikymmeniä ennen kuin ne kierrätetään tai heitetään pois.

Kuten edellä on nähty, mineraalien matka kallioperästä loppukäyttäjälle on yleensä pitkä, eikä suuri yleisö yleensä käsitä sitä. Raaka-ainelähteisiin ja kaikkiin kaupan hyllyä edeltäviin, tuotantoketjun alkupään prosesseihin liittyvät ongelmat eivät useinkaan ole läpinäkyviä ja jäävät siksi piiloon kuluttajilta. Tämä on totta varsinkin elektroniikassa. Elektroniikan valmistukseen käytetään lukuisia metalleja, joita louhitaan kaivoksissa eri puolilla maailmaa (Bobba ja muut 2020). Sähkötuotteen elinkaari on yleensä lyhyt, ja varsinkin kehittyvissä maissa käytetty tuote arvokkaine metalleineen usein heitetään pois sen sijaan, että materiaalit otettaisiin talteen ja kierrätettäisiin. Osasyy tähän on se, että tuotteissa on useita metalleja hyvin pieniä määriä, eli niiden talteenotto ja kierrätys voi olla haastavaa tai jopa mahdotonta. Tämä on selvästi kestämätön malli, kun otetaan huomioon mineraalien jatkuvaan hankkimiseen liittyvät haasteet, tehty työ, investoinnit ja negatiiviset ympäristö- ja yhteiskuntavaikutukset.

Globalisaation, väestönkasvun, kaupungistumisen, nousevien markkinoiden ja ilmastonmuutoksen lisäksi myös digitalisaatio on yksi käynnissä olevista ja tulevaisuuden megatrendeistä (Rasmussen 2011, Kiiski Kataja 2016, European Strategy and Policy Analysis System 2019). Digitaaliset teknologiat ovat myös strategisia teknologioita, jotka ylläpitävät valtavaa digitaalista sektoria mutta myös mahdollistavat teknologioita kaikille tässä raportissa mainituille teollisuudenaloille ja teknologioille (Bobba ja muut 2020). Yhteiskuntamme digitalisoituvat, ja digitalisaation tarpeisiin laitteita tuottava teollisuus laajenee ja monipuolistuu nopeasti. Elektroniikkaa käytetään kasvavissa määrin myös viihteeseen, ajanviettoon ja elämän helpottamiseen. Laitteet ja digitaaliset palvelut suunnitellaan usein käytettävyyttä silmällä pitäen, ja uusia ominaisuuksia ja sovelluksia suunnitellaan jatkuvasti. Saavutettu elämys voi toisinaan ylittää hyödyllisyyden. Vaikka yksittäiseen laitteeseen tarvitaan vain pieniä määriä mineraaliraaka-aineita, näiden pienten laitteiden kokonaistuotantomäärät synnyttävät merkittävää metallien ja mineraalien kysyntää.

Digitalisaatio on nyky-yhteiskunnan olennainen osa, mutta se on edelleen verrattain uusi ilmiö. Vaikka digitalisaatiota sovelletaan tällä hetkellä useissa toiminnoissa, malminetsintä ja louhinta mukaan lukien (esim. Jang & Topal 2020), suuri yleisö ja päätöksentekijät pitävät usein digitalisaatiota ja mineraaliraaka-aineita erillisinä asioina. Sitä, miten siirtymä fossiilittomaan tulevaisuuteen vaikuttaa metallien ja mineraalien kysyntään, on tutkittu varsin hyvin. Laitteiden (esim. tietokoneet, kuitukaapelit, tietokonesirut ja niiden osat kuten kondensaattorit, diodit ja näytöt) aiheuttamaa raaka-aineiden kysyntää on kuitenkin tutkittu vain vähän (Bobba ja muuut 2020, UNCTAD 2020). Digitalisaation fyysinen puoli on yhä piilossa. Esimerkiksi EU:lla on raaka-aineita ja digitalisaatiota koskevia linjauksia, mutta ei sellaisia, joka käsittelisi näitä yhdessä. Tämä koskee tietysti myös muita sektoreita. Kannattaa huomata myös se, että esimerkiksi vihreään energiaan siirtymiseen tarvittavat raaka-aineet ovat suurilta osin samoja kuin ne, joita digitalisaatioon tarvitaan, vaikkakin hyvin erilaisissa määrissä. Raaka-aineiden riittävyyttä on kuitenkin tutkittu vain vähän (esim. Bobba ja

muut 2020, UNCTAD 2020, IEA 2021, Michaux 2021). Kun puhutaan ”digitalisaation raaka-aineista”, voidaankin joskus viitata myös dataan, jota sitäkin voidaan ”louhia” (esim. Laine 2015, Windsor 2016). Näistä syistä johtuen Suomen itsenäisyyden juhlarahasto (Sitra) pyysi Geologian tutkimuskeskusta (GTK), Suomen ympäristökeskusta (SYKE) ja Teknologian tutkimuskeskusta (VTT) tutkimaan aihetta. Tavoitteena on ollut täyttää aihetta koskevissa tiedoissa olevia aukkoja ja käsitellä teemoja yhdessä. Konsortio laati tämän raportin, joka vastaa aihetta koskevan tiedon tarpeeseen. Raportin tavoitteena on tukea askeleita, joilla digitalisaatiossa voitaisiin siirtyä kohti vastuullisempaa raaka-aineiden käyttöä ja ennen kaikkea raaka-aineiden parempaa kierrätystä, jolla niiden elinkaarta voidaan pidentää merkittävästi.

1 DIGITALISAATIO – KOKONAISKUVA

Digitalisaatio on trendi, joka muuttaa sekä julkisen että yksityisen sektorin toimintaa. Kyse ei ole vain informaation hallinnasta useissa tietojärjestelmissä – datasta halutaan myös luoda taloudellista arvoa. Tuotteiden, palveluiden ja prosessien digitalisaatio tekee nykyisistä tuotteista, palveluista ja prosesseista vanhentuneita ja siten sekoittaa kilpailuasetelmia, olemassa olevia teollisuuden rajoja ja yritysverkostoja (esim. Millar ja muut 2017). Digitalisaation on sanottu muovaavan myös työmarkkinoita, sillä se vähentää tiettyjä tehtäviä ja lisää toisia luomalla täysin uusia tuotteita ja palveluita (Arntz ja muut 2016, Pajarinen & Rouvinen 2014). Digitaaliset teknologiat voivat tukea yksilöiden ja yhteisöiden voimaantumista sekä luoda merkityksellisiä tehtäviä, hyvinvointia ja ekologisesti kestäviä talous- ja yhteiskuntajärjestelmiä, jotka vastaavat planeettamme kantokykyä. Digitalisaatio on luonut työkaluja laajempaan kansalaisviestintään, vuorovaikutukseen ja vaikuttamiseen, mutta samalla se on myös vauhdittanut demokratian vastaisten voimien, populismin ja erilaisten salaliittoteorioiden nousua. Laajalla internetin ja sosiaalisen median käytöllä voi myös olla psykologisia vaikutuksia. Näitä ovat esimerkiksi voimakas riippuvuus ja masennus. Tämä asettaa kysymyksen siitä, miten voimme käyttää digitalisaation tarjoamia mahdollisuuksia ympäristön, yhteiskunnan ja talouden kannalta vastuullisella tavalla. Digitaalisen vallankumouksen seuraamuksista tarvitaan lisää tutkimusta, ja nykyajattelua pidemmälle tähtäävien ratkaisuiden kehittämiseen on panostettava entistä enemmän.

Euroopan komissio on tunnistanut digitalisaation yhdeksi avaintekijäksi, jonka avulla Euroopan vihreän kehityksen ohjelman ja kestävän kehityksen tavoitteet voidaan saavuttaa (European Commission 2020a). Digitaalisia ratkaisuja pidetään keskeisinä, kun halutaan edistää kiertotaloutta, auttaa kaikkia sektoreita irtautumaan fossiilipolttoaineista sekä vähentää tuotteiden yhteiskunnallista ja ympäristöjalanjälkeä. Digitalisaatio on myös keskeinen osatekijä ja mahdollistaja, kun halutaan integroida elinkaariajattelu materiaali-, tuote- ja järjestelmäsuunnitteluun. Elinkaariajattelu voi johtaa parempaan energiatehokkuuteen, pienempään energiankulutukseen, raaka-aineiden ja tuotteiden parempaan jäljitettävyyteen sekä mahdollistaa tuotteiden elinkaaren pidentämisen ja kierrätettävyyden.

EU-tasolla kiinnostus kiertotalousaloitteita kohtaan kasvaa, ja tärkeimpiä syitä tähän ovat elektroniikkalaiteromun lisääntyminen, elektronisten laitteiden arvokas raaka-ainesisältö (Forti ja muut 2020) ja kasvava riippuvaisuus ulkomaisista digitaalisista komponenteista ja teknologioista (Bobba ja muut 2020). Elektroniikan kiertotalousaloite pyrkii varmistamaan, että laitteiden suunnittelussa on huomioitu kestävyys, huolto, purku, korjaaminen, uudelleenkäyttö ja kierrätys. Aloite sisältää myös oikeuden pidentää elektronisten laitteiden elinkaarta korjaamalla tai päivittämällä sekä ennenaikaisen vanhenemisen välttämisen. (European Commission 2020a)

1.1 Digitalisaation erilaiset roolit

Vaikka digitaalisia teknologioita pidetään usein muina kuin materiaalipohjaisina ratkaisuina, ne ovat riippuvaisia laitteista ja niillä on oma ympäristöjalanjälkensä. Tieto- ja viestintäteknologiasektorin (ICT) ympäristöjalanjäljen suurimmat aiheuttajat ovat energiankulutus ja siitä syntyvät

kasvihuonekaasupäästöt, infrastruktuurissa ja laitteissa käytetyt raaka-aineet sekä päästöt ilmaan, veteen ja maaperään (Ojala ja muut 2020). Keskeisiä positiivisia vaikutuksia ovat digitaalisten teknologioiden rooli muiden sektorien kasvihuonekaasujen vähentämisessä (esim. digitaaliset ohjausjärjestelmät, IoT), ympäristön- ja luonnonsuojelun tukeminen (esim. seurantalaitteet) ja ilmastonmuutokseen sopeutumisen helpottaminen (ibid.). Myös muiden sektorien ympäristöjalanjälkien vähentäminen on yksi digitalisaation positiivisista vaikutuksista.

Taloudellinen arvo

Digitaalinen talous on globaalin bruttokansantuotteen (BKT) keskeinen tekijä, ja sen osuus BKT:stä kasvaa jatkuvasti. Digitalisaation taloudellisesta kokonaisarvosta on esitetty useita arvioita. Jos tarkastellaan digitalisaation laajinta soveltamisalaa, Maailman talousfoorumi arvioi, että **digitaalisen transformaation globaali arvo yhteiskunnalle ja teollisuudelle ylittää 80 biljoonaa euroa vuonna 2025** (European Parliamentary Research Service 2019). Globaalin digitaalisen talouden arvoksi vuonna 2016 taas arvioitiin 9,55 biljoonaa euroa, mikä vastasi 15,5 %:a globaalista BKT:stä (Huawei & Oxford Economics 2017). Tämä analyysi huomioi sekä suorat vaikutukset että ICT:n ulkoisvaikutukset. Vuosina 2000–2015 digitaalinen talous kasvoi 2,5 kertaa nopeammin kuin globaali BKT ja lähes kaksinkertaisti kokonsa (ibid.). Suurin osa digitaalisen talouden arvosta tuotetaan kuitenkin vain muutamissa talouksissa: Yhdysvalloissa (35 %), Kiinassa (13 %), Japanissa (8 %) ja EU:ssa (Islanti, Liechtenstein ja Norja mukaan luettuna) (25 %).

Yhdysvalloissa digitaalisen talouden osuus BKT:stä oli 6,9 % vuonna 2017 (BEA 2019). Tässä analyysissä ei kuitenkaan otettu huomioon digitaalisen talouden ulkoisvaikutuksia. Digitaalisen talouden arvonlisäys kasvoi vuosina 1997–2017 noin 10 % vuodessa, kun talous yhteensä kasvoi 2,3 % vuodessa (ibid.). EU:ssa digitaalisen talouden arvonlisäys oli vuonna 2017 yhteensä 475 miljardia euroa, joka vastasi 3,6 %:a EU:n BKT:stä (Eurostat 2021). EU:ssa ICT-palveluiden arvo oli yli kymmenen kertaa ICT-valmistuksen arvoa suurempi (ibid.).

Yhteiskunnalliset ja ympäristövaikutukset

Digitaalisilla teknologioilla on suuret mahdollisuudet parantaa eliniänodotettamme ja elämänlaatuamme (European Parliamentary Research Service 2019). Digitaalinen talous on EU:ssa merkittävä työnantaja: vuonna 2017 EU:n ICT-sektori työllisti noin 5,4 miljoonaa ihmistä (Eurostat 2021). Digitaalisen talouden ympäristövaikutukset ovat nekin merkittäviä. Digitalisaation ympäristövaikutusten suurimpia aiheuttajia ovat internetyhteyskäytäntöä käyttävien laitteiden lisääntyminen 2,4 laitteesta henkeä kohti vuonna 2018 vuodelle 2023 ennustettuun 3,6 laitteeseen henkeä kohti (yhteensä 29,3 miljardia) sekä kiinteän, mobiili- ja 5G-verkon nopeasti kasvavat nopeudet (Cisco 2020). Globaalin internetliikenteen odotetaan kaksinkertaistuvan 4,2 zetabitistä (ZB) vuonna 2019 vuoteen 2022 mennessä (IEA 2020). Siksi myös datan luonti ja varastointi kasvavat radikaalisti. Lisäksi liittymien, datan luomisen ja varastoinnin sekä laitteiden kasvava määrä lisää loppukäyttäjälaitteiden ja tukiinfrastruktuurin, esim. datakeskusten, valmistusta. Tästä kehityksestä seuraa kasvava sähkön- ja raaka-aineiden kulutus sekä entistä suuremmat päästöt, ellei vaikutuksia kompensoida teknologisilla innovaatioilla ja poliittisilla linjauksilla, jotka lisäävät ICT:n materiaali- ja energiatehokkuutta. Tämän lisäksi digitalisaatio kuluttaa osan uusiutuvasta energiantuotannosta, joka muuten voitaisiin käyttää energiaintensiivisillä sektoreilla, kuten teräksen tai sementin valmistuksessa.

Aiemmat ICT:n vastuullisuutta koskevat tutkimukset ovat keskittyneet pääasiassa alan päästöihin ja energiankulutukseen. Arviot digitaalisen talouden energiankulutuksesta vaihtelevat 5,4:stä 8 %:iin energian kokonaiskulutuksesta (Belkhir & Elmerligi 2018, Hiekkanen ja muut 2021, Malmodin & Lundén 2018). Sektorin sähkönkulutukseksi Euroopan maissa arvioidaan 0,5–6,4 % kokonaiskäytöstä (Hiekkanen ja muut 2021). Digitaalisen talouden energiankulutus ja päästöt ovat viime vuosikymmeninä kasvaneet jatkuvasti. Länsi-Euroopan osalta Hiekkanen ja muut (2021) esittävät vuodesta 2010 vuoteen 2020 tapahtuvalle energiankulutuksen kasvulle konsensusarvon 30 %. Lähteenä käytettyjen tutkimusten perusteella arviot digitaalisen talouden globaaleista kasvihuonekaasupäästöistä vaihtelevat 2,6:sta 5 %:iin globaaleista kokonaispäästöistä (Belkhir & Elmeligi 2018, LVM 2021, Malmodin & Lundén 2018). Päästöt ja energiankulutus vaihtelevat huomattavasti tutkimuksen aihepiirin ja datan saatavuuden perusteella. Voidaan kuitenkin olettaa, että sektorin sähkönkulutus sekä kasvavasta kulutuksesta ja IP-yhteyttä käyttävien laitteiden kasvavasta tarpeesta syntyvät kasvihuonekaasupäästöt kasvavat globaalisti. Uusiutuvia energiamuotoja otetaan kuitenkin lisää käyttöön, joten lähitule-

vaisuudessa kasvihuonekaasupäästöt saattavat pienentyä, varsinkin tietyillä markkinoilla.

Kuten on jo mainittu, digitaalinen talous ei ole aineetonta. Se rakentuu fyysiselle infrastruktuurille ja sen palveluita käytetään fyysisten ICT-laitteiden kautta. Näiden tuotantoon tarvitaan suuria määriä raaka-aineita, jotka ovat usein kriittisiä valmistavien maiden kansantaloudelle. Elinkaarensa päässä ICT-laitteet tulisi kerätä ja käyttää uudelleen tai kierrättää. Jopa 82,6 %:a globaalista sähkö- ja elektroniikkaromusta (SER) ei kuitenkaan dokumentoida, kerätä ja kierrätetä asianmukaisesti (Forti ja muut 2020). Nämä kierrättämättä jäävät SER-virrat saastuttavat ympäristöä vuosittain 50 tonnilla elohopeaa, 71 000 tonnilla bromattuja palonestoaineita ja 98 miljoonalla hiilidioksidiekvivalenttitonnilla päästöjä pelkästään jääkaapeista ja ilmastointilaitteista (ibid.). SER:ssa on yhteensä yli 1 000 eri kemikaalia, joista useat ovat vaarallisia. Lisäksi jos ICT-laitteita ei kierrätetä asianmukaisesti, niissä käytettyjä materiaaleja ei saada jatkokäyttöön.

Digitaalisen talouden globaalista materiaalinkäytöstä on vain vähän tutkimuksia. Yhdessä näistä Malmodin ja muut (2018) arvioivat, että **ICT- ja viihde- ja mediateollisuuden osuus on noin 0,5 % raaka-aineiden kokonaiskäytöstä.** Joidenkin metallien, kuten indiumin, galliumin ja germaniumin, osalta digitaalinen talous kuitenkin vastaa 80–90 %:a kokonaiskäytöstä. Energiankäyttöön ja kasvihuonekaasupäästöihin verrattuna raaka-aineiden kokonaiskäyttö on maltillista. Digitaalinen talous kuitenkin käyttää suurimman osan tietyistä (kriittisistä) raaka-aineista. Vaikka määrät ovat pieniä, raaka-aineiden talteenotto ja kierrätys on energiankulutuksen, teknologian ja talouden näkökulmasta haastavaa, sillä yksittäisessä laitteessa on hyvin vähän kutakin raaka-ainetta.

ICT:n arvo muille sektoreille

Vaikka ICT-sektorin ympäristövaikutukset kasvavat, sektorin suurimmaksi vaikutukseksi arvellaan tehokkaamman energian- ja raaka-aineiden käytön sekä paremman ympäristötehokkuuden mahdollistamista muille teollisuudenaloille (ITU 2012, Ojala ja muut 2020). Lisäksi digitaaliset teknologiat vaikuttavat positiivisesti tuottavuuteen ja talouskasvuun (European Parliamentary Research Service 2019). Digitaaliset teknologiat edistävät siirtymää kohti kiertotaloutta optimoimalla tuotantoprosesseja, pidentämällä tuotteen käyttösyklejä ja korvaamalla fyysisiä tuotteita. Digitaalisilla teknologioilla nähdään potentiaalia myös ympäristön- ja luonnonsuojelussa ja ilmastonmuutokseen sopeutumisessa (Ojala ja muut 2020). Digitaaliset teknologiat mahdollistavat ja tukevat myös raaka-ainesektorin teknologioita. Esimerkkejä tästä ovat tehostunut malminetsintä, raaka-aineiden prosessoinnin optimointi, raaka-aineiden jäljitettävyys, materiaalipassit (esim. mahdollisten konfliktimineraalien jäljittäminen) ja muut kriittiseen raaka-ainetehokkuuteen tähtäävät ratkaisut.

Toisaalta on väitetty, että ICT:n kokonaisnettovaikutuksen arviointi on haastavaa, ja todellista arvoa tuskin saadaan suorien ja epäsuorien vaikutusten monimutkaisuuden vuoksi koskaan selville (Horner ja muut 2016). Varsinkaan epäsuoria vaikutuksia ei ole helppo laskea yksinomaan ICT:n ansioksi, mutta sekä negatiiviset että positiiviset vaikutukset ovat usein yhteydessä ICT:hen. Näitä kutsutaan usein takaisinkytkentävaikutuksiksi, epäsuoriksi vaikutuksiksi, heijastusvaikutuksiksi tai muiksi vaikutuksiksi (Börjesson Rivera ja muut 2014).

1.2 Keskeiset digitaaliset teknologiat

Digitalisaatio kattaa laajan skaalan digitaalisen teknologian trendejä. Näitä ovat esimerkiksi virtualisointi, anturipohjainen teknologia esineiden internet (IoT) mukaan lukien, 3D-tulostus, langattomat viestintäteknologiat (esim. 5G), robotisaatio, digitaaliset alustat, digitaaliset kaksoset, lohkoketjuteknologiat, koneoppiminen ja tekoäly. EU:ssa tunnistettuja ilmiöitä ovat digitaalisten teknologioiden kasvava raaka-aineiden kulutus ja riippuvaisuus tuontiraaka-aineista (Bobba ja muut 2020). Seuraavassa esitellään joitain keskeisiä teknologioita.

3D-tulostus muuttaa perinteisiä valmistusprosesseja. Esinetulostuksessa luodaan esineitä 3D-mallin pohjalta liittämällä materiaaleja, esim. jauhetta tai nestettä, kerros kerrokselta, ilman muotteja tai työkaluja (Kellens ja muut 2017). Esinetulostuksen ansiosta valmiiden tuotteiden kansainvälisestä kaupasta on mahdollista siirtyä suunnittelun kansainväliseen kauppaan (UNCTAD 2019).

Tekoäly (AI) voidaan määritellä järjestelmäksi, joka pystyy ymmärtämään ympäristöään ja tekemään rationaalisia päätöksiä sen perusteella

(Nilsson 2010). Koneoppimisen menetelmät ovat tekoälyn haara. Koneoppimisella tarkoitetaan algoritmeja, jotka löytävät datasarjan kuvioiden takana vaikuttavat säännöt, oppivat nämä säännöt ja soveltavat niitä uusiin tilanteisiin (Hanski ja muut 2018).

Lohkoketju on hajautetun tilikirjan teknologian muoto, joka mahdollistaa useiden osapuolten väliset turvalliset ja luotetut tapahtumat ilman välittäjää (UNCTAD 2019). Teknologia kehitettiin alun perin Bitcoin-kryptovaluuttaa varten. Lohkoketjuteknologioita käytetään myös digitaalisessa tunnistautumisessa ja omistusoikeuksissa.

Esineiden internet (IoT) viittaa laitteiden ja koneiden tiettyihin internetiin yhteydessä oleviin laitteisiin (anturit, mittarit jne.), jotka voivat lähettää ja vastaanottaa tietoja (UNCTAD 2019). Esineiden internetissä laitteista ja koneista tulee tietojärjestelmän osia, jotka voivat tallentaa, käsitellä ja välittää tietoa ja tehdä yhteistyötä tiedon ympärillä (Bughin ja muut 2010).

Viidennen sukupolven (5G) langattomalla tiedonsiirtoteknologialla voidaan käsitellä massiivisia datamääriä (UNCTAD 2019). 5G liittyy esineiden internetiin ja mahdollistaa suurten anturi- ja älylaitemäärien liittämisen verkkoon (ibid.). 5G:n merkittävästi nopeampaa seuraajaa, 6G-verkkoa, kehitetään parhaillaan.

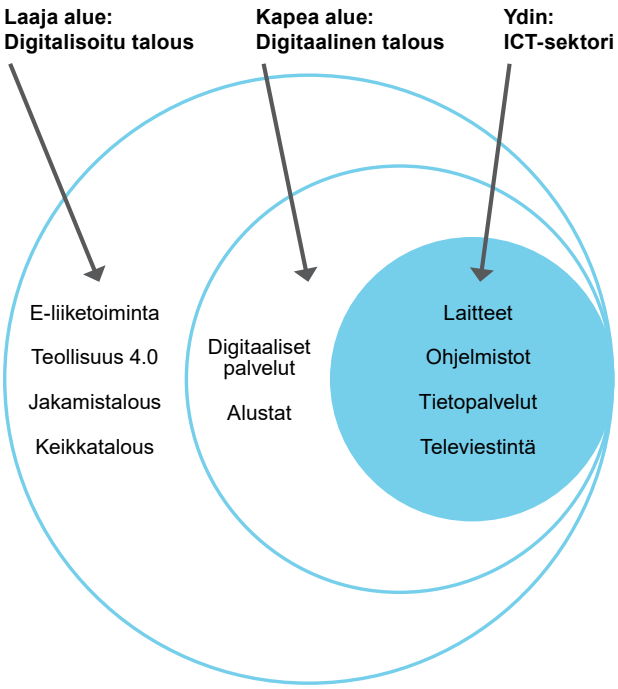
Robotisaatio mahdollistaa automatisoidut palvelut ja lähes automatisoidun tuotannon, ja siksi sillä on kasvava rooli esim. valmistavassa teollisuudessa.

Virtuaalitekiikka (VRT) sisältää virtuaalisen ja laajennetun todellisuuden sovellukset, ja sillä on merkittäviä käyttökohteita sekä kuluttaja- että teollisuuspuolella. Tällä hetkellä virtualisointia käytetään teollisuudessa koulutuksen, suunnittelun, asennuksen, huollon ja korjauksen tukena, ja sillä tuetaan myös tuotteiden ja järjestelmien suunnittelua ja hallintaa.

Kun näiden teknologioiden markkinaosuus kasvaa, samalla kasvaa myös ICT-laitteiden kulutus, ja tarvitaan entistä laajempaa tuki-infrastruktuuria. Järjestelmätason materiaalinkulutuksen kokonaisrakenne ja -määrä ovat kuitenkin vielä epävarmoja. Digitaalisten teknologioiden raaka-ainekulutusta käsitellään tarkemmin tämän raportin 2. osassa, ja joidenkin teknologioiden raaka-aineiden kulutusta käsittelevät myös Bobba ja muut (2020). Ku (2018) on sitä mieltä, että esineiden internetin markkinaosuuden kasvusta johtuva raaka-aineiden kulutuksen kasvu ei ole ”kovin hälyttävää”, kun sitä analysoidaan datan varastoinnin näkökulmasta. Tutkimuksessa ei kuitenkaan otettu huomioon datan prosessointia, tiedonsiirtoa tai muita IoT-laitteiden kasvavan määrän keskeisiä näkökohtia. Älylaitteiden ja IoT-järjestelmien elinkaari saattaa myös olla merkittävästi lyhyempi kuin muilla infrastruktuurin osilla, mikä asettaa haasteita infrastruktuurin elinkaaren hallinnalle (Kortelainen & Hanski, *painossa*). Yksi lyhyen elinkaaren syistä on laitteiden riippuvaisuus ohjelmistoista.

1.3 Digitaalinen talous

Digitaalisessa taloudessa on kolme kerrosta: ICT-sektori, digitaalinen talous ja digitalisoitu talous (Kuva 2). Ensinnäkin digitaalisen talouden ydinnäkökohtia ovat perustavanlaatuiset innovaatiot kuten puolijohteet ja prosessorit, ydinteknologiat kuten tietokoneet ja televiestintälaitteet sekä infrastruktuurin mahdollistaminen eli internet ja televiestintäverkot (UNCTAD 2019). Toiseksi IT-sektori tuottaa avaintuotteita ja -palveluita, jotka perustuvat digitaalisiin ydinteknologioihin. Näitä tuotteita ja palveluita ovat esimerkiksi digitaaliset alustat, mobiilisovellukset ja maksupalvelut. Kolmanneksi digitalisoituvia sektoreita on useita, mukaan lukien ne, jotka käyttävät enenevässä määrin digitaalisia tuotteita ja palveluita ja jotka ovat jo käyneet läpi digitaalisen murroksen. Näitä ovat rahoitusala, media, turismi ja liikenne. Digitalisoituvan talouden kasvun kannalta kriittisiä ovat digilukutaitoiset ja osaavat työntekijät, kuluttajat, ostajat ja käyttäjät. (ibid.)



Kuva 2. Digitaalisen talouden esittely. Digitaalisen talouden ydin on ICT sektori. Kapeasti ajateltuna digitaalinen talous käsittää digitaaliset palvelut ja alustat, laajemmin ajateltuna digitalisoituneet markkinat, talouden ja tuotannon. Soveltaen (Bukht & Heeks 2018).

1.3.1 ICT-sektori

OECD (2011) on tyypillinen lähde ICT-alan tilastoille ja päätöksenteolle. Sen perspektiivi digitaaliseen talouteen (raportissa tietotalous) on toisenlainen, sillä se yhdistää ICT-sektorin ja sisältö- ja sisällöntuotantosektorit. Tilastokeskus (2020) sisällyttää ICT-sektoriin seuraavat toimialat:

- 261 Elektronisten komponenttien ja piirilevyjen valmistus
- 262 Tietokoneiden ja niiden oheislaitteiden valmistus
- 263 Viestintälaitteiden valmistus
- 264 Viihde-elektroniikan valmistus
- 268 Tallennevälineiden valmistus
- 4651 Tietokoneiden, oheislaitteiden ja ohjelmistojen tukkukauppa
- 4652 Elektroniikka- ja viestintälaitteiden ja osien tukkukauppa
- 582 Ohjelmistojen kustantaminen
- 61 Televiestintä
- 62 Ohjelmistot, konsultointi ja siihen liittyvä toiminta
- 631 Tietojenkäsittely, palvelintilan vuokraus ja niihin liittyvät palvelut; verkkoportaalit
- 951 Tietokoneiden ja viestintälaitteiden korjaus

UNCTAD:in (2019) mukaan tieto- ja viestintäteknologian (ICT) sektori koostuu laitteiden valmistuksesta, ohjelmisto- ja IT-konsultoinnista, tietopalveluista ja televiestinnästä. Materiaalin kulutuksen näkökulmasta ja silloin, kun ei tarkastella energiankulutusta, ICT-laitteet ovat ICT-sektorin merkittävin osa.

1.3.2 ICT-laitteet

ICT-laitteilla tarkoitetaan kaikkia tietokoneiden ja niihin liittyvien laitteiden fyysisiä osia. ICT-laitteita ovat esimerkiksi päätelaitteet (älypuhelimet ja tabletit, reitittimet, modeemit, kannettavat ja pöytätietokoneet sekä julkiset näytöt), viihde- ja medialaitteet (TV:t ja muu viihde-elektroniikka), liityntäverkot (kiinteä ja mobiililaajakaista), yritysverkot ja datakeskukset (Malmodin & Lundén 2018). Tässä tutkimuksessa keskitytään seuraaviin ICT-laitteiden pääryhmiin:

- Loppukäyttäjien ICT-laitteet
- datakeskukset
- ICT- ja yritysverkkolaitteet ja -infrastruktuuri

Loppukäyttäjien ICT-laitteita kutsutaan myös sähkö- ja elektroniikkalaitteiksi, varsinkin SER:sta puhuttaessa. Sähkö- ja elektroniikkalaitteet ovat tuotteita, joissa on virtapiiri tai elektroniikkakomponentteja sekä virtalähde tai akku (Forti ja muut 2020, STEP 2014). Sähkö- ja elektroniikkalaitteiden tuotekategorioita ovat 1) lämmönvaih-

tolaitteet, 2) näytöt ja monitorit, 3) valaisimet, 4) suurlaitteet (pesukoneet, kuivausrummut, aurinkosähköpaneelit jne.), 5) pienlaitteet (imurit, pienet sähkötyökalut, sähkölelut jne.) ja 6) pienet IT- ja televiestintälaitteet (älypuhelimet, PC:t, reitittimet jne.) (Forti ja muut 2020).

Datakeskukset ovat IT-sektorin ydintä, ja ne koostuvat erilaisista laskenta- ja varastointiresursseista. Keskeisiä fyysisiä komponentteja ovat telineet, reitittimet, kytkimet, varastojärjestelmät ja palvelimet (Cisco 2021). Muita datakeskusten keskeisiä komponentteja ovat virranjakelujärjestelmä, keskeytymätön tehonsyöttö ja muut varavirtajärjestelmät sekä jäähdytys- ja automaatiojärjestelmät (Ojala ja muut 2020).

ICT- ja yritysverkkolaitteet ja -infrastruktuuri koostuvat liitännöistä, jotka käyttävät joko kiinteää tai langatonta datansiirtoa sekä erilaisia järjestelmiä, jotka vastaavat datan kytkennästä ja siirrosta. Verkot voidaan jakaa eri tavoin, esimerkiksi niiden alueellisen hierarkian (topologian) mukaan sisäverkkoihin, liityntäverkkoihin (tilaajaverkkoihin), alueverkkoihin ja runkoverkkoihin. Verkot voidaan jakaa myös julkisiin ja yksityisiin verkkoihin sen mukaan, tarjotaanko niillä viestintäpalveluita rajoittamattomalle vai rajoitetulle käyttäjäjoukolle.

1.4 ICT-laitteiden arvoketju

ICT-arvoketjun muodostavat mineraaliraaka-aineiden tuotanto, suunnittelu, valmistus, käyttö ja kierrätys. Näillä kaikilla on omat vastuullisuus- ja kestävyyshaasteensa.

Kuva 3. Elektronisten laitteiden arvoketjun kestävyyshaasteet.

1.4.1 Primääri- eli neitseelliset raaka-aineet ja uusioraaka-aineet

ICT-laitteiden kasvava määrä vaatii kiihtyvää raaka-aineiden tuotantoa. Kun tarkastellaan vielä ICT-sektoria laajempaa kokonaisuutta ja otetaan mukaan verkkokauppa, liikenteen sähköistyminen, teollisuus 4.0 ja robotit, mikroprosessorit ja prosessinhallinta jne., huomataan, että näillä sektoreilla tullaan tarvitsemaan valtavaa määrää raaka-aineita (UNCTAD 2020). Raaka-aineet voivat tulla joko primääri- tai uusiolähteistä. Primääriraaka-aineita käsitellään kattavasti 2. osassa. Uusioraaka-aineiden tehokkaampi talteenotto sähkö- ja elektroniikkalaiteromusta (SER) voisi vähentää primääriraaka-aineiden tarvetta merkittävästi.

Siinä on kuitenkin esteitä. Talteenottoasteet ovat varsinkin kriittisten metallien kohdalla hyvin matalia ja niitä on myös vaikeaa saada talteen, sillä metallurgisten prosessien termodynaamiset rajat tulevat vastaan. Materiaalien talteenotto laitteista on myös entistä haastavampaa, sillä laitteet muuttuvat jatkuvasti pienemmiksi (Wäger ja muut 2015). Raaka-aineiden talteenotto ja kierrätys SER:istä saattaa kuitenkin tulevaisuudessa olla mahdollista, jos niiden virrat voidaan yhdistää esimerkiksi elinkaarensa päässä olevista tuulivoimalakomponenteista saataviin metalleihin. Huisman ja muut (2017) käsittelee laajemmin uusioraaka-aineiden saatavuutta eurooppalaisessa kontekstissa. Forti ja muut (2020) arvioivat SER:in uusioraaka-aineiden määrää ja niiden potentiaalista arvoa (Taulukko 1). Arvon oletuksena on, että kaikki globaalisti syntyvä SER kierrätetään optimaalisesti.

Taulukko 1. Globaalisti syntyvän sähkö- ja elektroniikkaromun (SER) raaka-aineiden määrä ja potentiaalinen arvo vuonna 2019.

Metalli	tonnia	miljoonaa €	Metalli	tonnia	miljoonaa €
Hopea	1 200	487	Indium	200	14
Alumiini	3 046 000	5 098	Iridium	1	4,2
Kulta	200	7 973	Osmium	10	91
Vismutti	100	1,1	Palladium	100	2 970
Koboltti	13 000	871	Platina	2	60
Kupari	1 808 000	9 217	Rodium	10	269
Rauta	20 466 000	20 725	Rutenium	0,3	2,5
Germanium	10	0,34	Antimoni	76 000	542

1.4.2 Suunnittelu

Euroopan komissio on pyrkinyt edistämään ympäristöystävällistä tuotesuunnittelua eli ekosuunnittelua viime vuosikymmeninä. Useat suunnittelunäkökulmien parantamiseen tähtäävät EU-politiikat koskevat ICT-laitteita. Näitä poliittisia linjauksia ovat esimerkiksi sähkö- ja elektroniikkaromudirektiivi 2002/96/EY ja ekosuunnitteludirektiivi 2005/32/EY. SER-direktiivin tavoitteena oli puuttua sähkö- ja elektroniikkalaiteromun kasvavaan määrään. Direktiivin ensisijaisena tavoitteena oli SER:in syntymisen ehkäisy, ja se käsitteli resurssien tehokasta käyttöä, uudelleenkäyttöä, uusioraaka-aineiden talteenottoa, kierrättämällä ja muilla tavoilla sekä jokaisen sähkö- ja elektroniikkalaitteiden elinkaaressa mukana olevan toimijan ympäristötehokkuuden parantamista (European Commission 2021b). Ekosuunnitteludirektiivi puolestaan asettaa vaatimukset energiaa käyttäville tuotteille, joita ovat energiaa käyttävät tuotteet tai tuotteet ja osat, joita käytetään energian tuotannossa, siirrossa ja mittaamisessa. Vuonna 2009 direktiivi korvattiin kattavammalla ekosuunnitteludirektiivillä (direktiivi 2009/125/EY), joka aiemman direktiivin energiaa käyttävien tuotteiden lisäksi kattaa myös energiaan liittyvät tuotteet, esim. ikkunat, eristemateriaalit ja vastaavat rakentamisessa käytetyt tuotteet. Ekosuunnitteludirektiiviä toteutetaan tuotekohtaisilla asetuksilla, joita voidaan soveltaa suoraan kaikissa EU-maissa.

Vuonna 2020 Euroopan komissio esitteli uuden kiertotalouden toimintasuunnitelman (European Commission 2020a), joka on yksi ilmastoneutraaliuteen vuonna 2050 tähtäävän Euroopan vihreän kehityksen ohjelman kulmakivistä. Kiertotalouden toimintasuunnitelma pyrkii laajentamaan ekosuunnitteludirektiiviä siten, että se kattaa myös muut kuin energiaan liittyvät tuotteet. Se ottaa huomioon myös EU:n ympäristömerkintäasetuksen (asetus (EY) 66/2010), tuotteiden ympäristöjalanjäljen (PEF, European Commission 2020f) sekä EU:n yhteiset kriteerit vihreille hankinnoille (European Commission 2020d). Ekosuunnittelu on yksi kestävän tuotepolitiikan pääteemoista ja Euroopan komissio esittää sille lainsäädännöllisiä aloitteita toimintaohjelmassaan (European Commission 2020e). Ekosuunnittelun kautta Euroopan komissio pyrkii edistämään esim. tuotteiden kestävyyttä, uudelleenkäytettävyyttä, huollettavuutta ja korjattavuutta, sekä parantamaan tuotteiden resurssitehokkuutta ja pienentämään niiden ympäristöjalanjälkiä. Toimintasuunnitelma kiinnittää huomiota varsinkin sellaisiin sektoreihin ja tuoteryhmiin, jotka käyttävät eniten luonnonvaroja ja joilla on paljon kiertotalouspotentiaalia, kuten

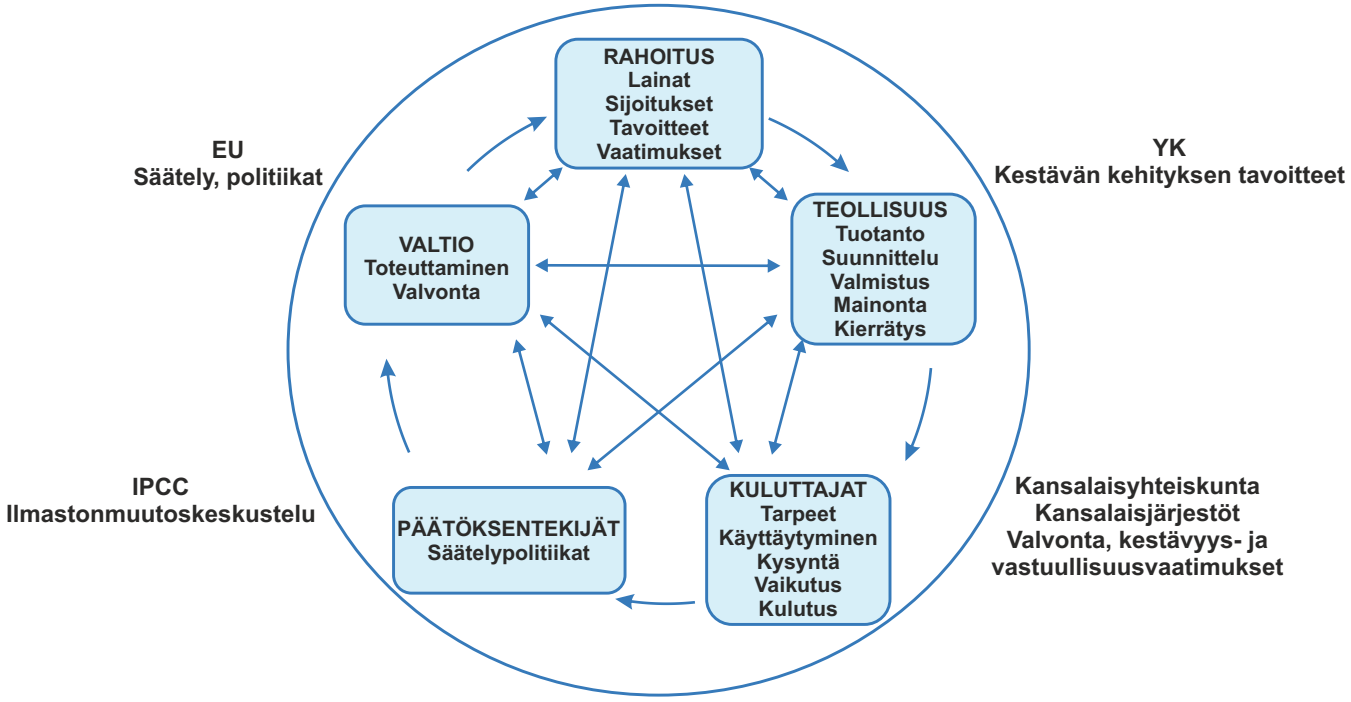
esimerkiksi elektroniikkaan. Toimintasuunnitelman on tarkoitus tuoda elektroniikan ja ICT:n kiertotalouteen useita parannuksia (European Commission 2020e). Näitä ovat:

- Elektroniikkaa ja ICT-laitteita koskevat ekosuunnitteludirektiivin alaiset sääntelytoimet. Näillä varmistetaan, että laitteiden suunnittelussa otetaan huomioon energiatehokkuus ja kestävyys, korjattavuus, päivitettävyys, huolto, uudelleenkäyttö ja kierrätys.
- Oikeus korjata, eli kuluttajilla on oltava mahdollisuus korjata ja muunnella laitteitaan helpommin
- Kaikille matkapuhelimille yhteisen laturin käyttöönotto
- EU:n laajuinen palautussuunnitelma, joka koskee vanhojen matkapuhelimien, tablettien ja latureiden palauttamista tai takaisin myymistä
- Sähkö- ja elektroniikkalaitteiden vaarallisten aineiden rajoitukset

Suunnittelulla on myös mahdollista vaikuttaa kierrätetyn materiaalisisällön käyttöön ja tukea ja kehittää digitaalisia passeja, joiden avulla tuotteita voidaan seurata niiden koko elinkaaren ajan (Adisorn ja muut 2021).

1.4.3 ICT-markkina ja sen toimijat

Yksinkertaistettuna ICT-arvoketju ja -markkinat koostuvat viidestä päätoimijasta, jotka ovat teollisuus, kuluttajat, päätöksentekijät, valtio ja rahoitussektori (Kuva 4). Kullakin toimijalla on oma roolinsa, ja toimijat ovat vuorovaikutuksessa keskenään. Teollisuus tuottaa primääri- ja uusioraaka-aineita louhimalla ja kierrättämällä sekä suunnittelee, valmistaa ja mainostaa ICT-laitteita. Teollisuus on riippuvainen rahoitussektorin investoinneista ja lainoista, joille on tiettyjä vaatimuksia. Kuluttajat hankkivat ja kuluttavat tuotteita omien tarpeidensa ja toimintatapojensa mukaisesti ja luovat kysynnän. Kuluttajat voivat vaikuttaa teollisuuteen ja rahoitussektoriin. Päätöksentekijät luovat lainsäädäntöä ja standardeja, joilla teollisuutta säädellään. Valtiot (hallitukset) sääntelevät ja valvovat teollisuuden toimintaa kansallisella tasolla ja ovat myös merkittävä kuluttajasegmentti julkisilla hankinnoillaan. Teollisuus ja rahoitussektori lobbaavat päätöksentekijöitä ja valtioita omien etujensa mukaisesti. Kuluttajat (kansalaiset) valitsevat päätöksentekijät ja painostavat näitä ja hallitusta.



Kuva 4. Yksinkertaistetun digitaalisen markkinan päätoimijoiden roolit ja vuorovaikutus, jossa ylikansalliset tahot ja tavoitteet vaikuttavat vastuullisuuden hyväksi.

Tämän tason lisäksi kannattaa huomioida vielä vuorovaikutuksen ja vaikutuksen ylikansalliset ja globaalit tasot. Kansalaisyhteiskunta (ennen kaikkea globaalit kansalaisjärjestöt), Euroopan unioni (EU), Yhdistyneet kansakunnat (YK), hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli (IPCC) ja muut toimijat vaikuttavat julkiseen keskusteluun ja valtioiden vastuullisuutta tavoittelevaan politiikkaan ja toimiin. IPCC esimerkiksi tuottaa ilmastonmuutoksesta tietoa, joka on vaikuttanut YK:n kestävän kehityksen tavoitteisiin. EU luo digitaalista ja raaka-aineteollisuutta koskevia asetuksia ja politiikkaa nuo tavoitteet mielessään, kun taas kansalaisyhteiskunta ja -järjestöt vaativat kestävyyttä ja vastuullisuutta niin teollisuudelta, kuluttajilta, rahoitussektorilta kuin valtioiltakin.

EU:ssa käytetyt ICT-laitteet on yleensä valmistettu muualla, tavallisimmin Aasiassa. Esimerkiksi viestintälaitteiden valmistus EU:ssa on laskenut vuonna 2007 valmistetusta 207 miljoonasta yksiköstä vuoden 2017 vaatimattomaan 2,8 miljoonaan yksikköön (Rizos ja muut 2019). EU:ssa tärkeimpiä valmistettuja ICT-tuotteita ovat elektroniset komponentit ja piirilevyt (57,2 %), viestintälaitteet (25,9 %), tietokoneet ja niiden oheislaitteet (10,9 %), viihde-elektroniikka (6,0 %) ja tallennevälineet (0,1 %). EU:ssa ICT-valmistuksen arvonlisäys on kymmenen kertaa ICT-palveluiden arvonlisäystä pienempi (Eurostat 2021).

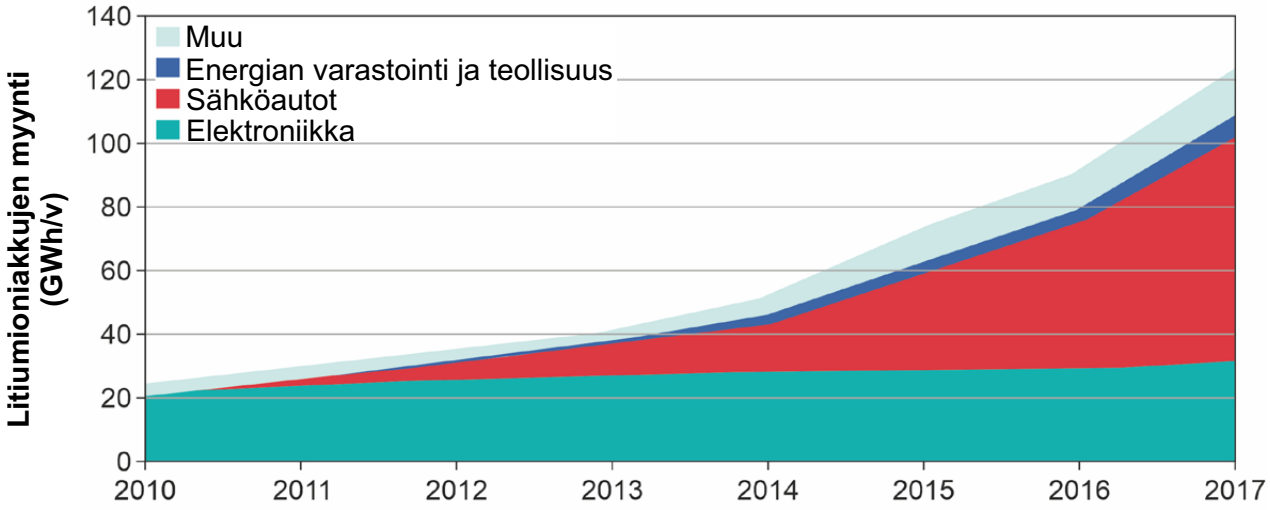
Mobiililaitteiden viimeaikainen myynti

Matkapuhelinten, kannettavien tietokoneiden ja tablettitietokoneiden globaali myynti on pysynyt suhteellisen vakaana muutamat viime vuodet. Kasvu on ollut pitkällä aikavälillä rajallista, ja kannettavien tietokoneiden myynti on jopa hieman laskenut. Koronapandemian aiheuttama etätyön ja etäopiskelun kasvu on kuitenkin lisännyt kannettavien tietokoneiden myyntiä. Kannettavien tietokoneiden myynti saavutti huippunsa vuonna 2011, jonka jälkeen markkinan kasvu on hidastunut. Tämä johtuu älypuhelimien ja tablettien noususta. Yhä useammat kuluttajat käyttävät älypuhelimia ja tabletteja vapaa-ajallaan, mutta edelleen kannettavia tietokoneita työssään. Kannettavien tietokoneiden parempi kestävyys ja pidemmät vaihtosyklit vaikuttavat nekin kysynnän hidastumiseen. Kannettavia tietokoneita kuitenkin tarvitaan jatkuvasti kaupalliseen käyttöön, joten markkina on suhteellisen vakaa.

Koronavirukseen liittyvä epävarmuus ei ole poistunut, ja etätyöt ja etäopiskelu jatkuvat vielä vuonna 2021 ja todennäköisesti osittain vuonna 2022. Siksi kannettavien tietokoneiden globaalien toimitusten odotetaan jatkavan hienoista kasvuaan vuosina 2021 ja 2022. Kysyntä hidastuu asteittain vuonna 2023.

Litiumioniakkujen globaalit markkinat

Elektroniikkamarkkinan saturaatiosta huolimatta litiumioniakkujen myynti jatkoi kasvuaan, ennen kaikkea sähköautojenällistyttävän kysynnän vuoksi (Tsiropoulos ja muut 2018, Zhang 2020, Kuva 5). Viisi vuotta markkinoille tulonsa jälkeen litiumioniakkujen myynti sähköautoja varten ohitti elektroniikkaa varten myytyjen litiumioniakkujen määrän (Kuva 5). Akkujen myynti on kasvanut vuodessa keskimäärin 67 %, ja trendin odotetaan jatkuvan. Sähköautojen ja kiinteiden energiavarastojen osuus litiumioniakkujen myynnistä kasvoi vuosikymmenen alun 5 %:sta vuoden 2017 yli 60 %:iin.



Kuva 5. Litiumioniakkujen myynnin kehitys (Tsiropoulos ja muut 2018).

1.4.4 Käyttövaihe ja käyttöiän pidentäminen

ICT-laitteet ovat monimutkaisia ja pitkälle kehittyneitä, ja siihen suhteutettuna niiden elinikä on verrattain lyhyt. Aiempien tutkimusten mukaan älypuhelimen käyttöikä voi olla jopa 5 vuotta (Bakker ja muut 2014), mutta tuoreemmat tutkimukset antavat ymmärtää, että käyttöaika olisi jopa alle 2 vuotta (Lu 2017, Cordella ja muut 2021). Älypuhelimiin verrattuna älytelevision käyttöikä on yleensä pidempi, jopa 5–10 vuotta (Berwald ja muut 2020). Tällaiset käyttöiät ovat vastuullisuuden kannalta liian lyhyitä. Tuotantoteollisuuden innovoima nopea tahti luo joillekin asiakassegmenteille painetta laitteiden nopeampaan päivittämiseen. Teknologian kehittymistä ei voi kieltää, mutta myös subjektiivisella tarpeiden luomisella on oma roolinsa. Kuluttajien jatkuva laitteiden vaihtaminen tarkoittaa, että tarvitaan lisää primaari- ja uusioraaka-aineita – kaikkine vaikutuksineen.

ICT-laitteiden käyttöiän pidentäminen on erittäin tärkeää: jos älypuhelimen käyttöikä saadaan pidennettyä 21,6 kuukaudesta 45,6 kuukauteen, vähentyneet kasvihuonekaasupäästöt vastaavat 546 000 uuden älypuhelimen päästöjä (Rizos ja muut 2019). EU:n uusissa asetuksissa esitetään tuotteen käyttöiän pidentämistä suunnitteluun suuntautuneilla keinoilla. Yksi keinoista on oikeus korjaamiseen. Muita käyttöiän pidentämisen keinoja ovat esimerkiksi laitteiden korjauspisteiden parempi kattavuus, leasing-laitteet ja korjaustöiden alempi verokanta.

ICT-laitteissa on huomattavaa, mutta käyttämätöntä uudelleenkäyttöpotentiaalia. Messmann ja muut (2019) kertoo, että 19,2 % kerätystä SER-romusta voitaisiin pienellä puhdistuksella käyttää heti uudelleen, ja 39 % voitaisiin korjata ja käyttää sen jälkeen uudelleen. Vain 42 % romusta oli niin vaurioitunutta, että sitä ei voida korjata. Todellisuudessa vain 0,5 % kerätyistä ICT-laitteista päätyy uudelleenkäyttöön. Loput kierrätetään (78,8 %) tai poltetaan (11 %).

1.4.5 Kierrätys ja sähkö- ja elektroniikkalaiteromu

ICT-laitteesta (tai sähkö- ja elektroniikkalaitteesta) tulee sähkö- ja elektroniikkalaiteromua (SER), kun omistaja heittää sen pois eikä aio käyttää sitä uudelleen (STEP 2014). SER-romua ovat kaikentyyppiset sähkö- ja elektroniikkalaitteet ja niiden osat. Sähkö- ja elektroniikkalaitteiden määrä kasvaa jatkuvasti, ja ennemmin tai myöhemmin nämä laitteet pitää vaihtaa uusiin vikojen, teknisen vanhenemisen tai muiden syiden vuoksi.

Eurooppalaisessa keskivertokotitaloudessa on 72 sähkö- ja elektroniikkalaitetta, joista 11 on rikki tai pois käytöstä (Leroy 2020). Globaalilla tasolla SER:a oli vuonna 2019 yhteensä noin 53,6 miljoonaa tonnia (Forti ja muut 2020). Dokumentoitu keräys ja kierrätys kattoi noin 9,3 miljoonaa tonnia eli 17,4 % syntyneestä SER:sta (ibid.). EU:ssa kierrätysasteeksi arvioidaan jotain alle 40 %:n ja 49 %:n välillä, ja SER on nopeimmin kasvava jätevirta (European parliament 2020). EU on dokumentoidussa SER:ssa ensimmäisellä sijalla, ja seuraavina tulevat Aasia (11,7 %), Amerikat (9,4 %), Oseania (8,8 %) ja Afrikka (0,9 %) (Forti ja muut 2020). Globaalisti SER:n vuotuinen kasvu (2 miljoonaa tonnia) on ollut suurempaa kuin kierrätyksen ja keräyksen kasvu (0,4 miljoonaa tonnia). **Ihanteellisesti talteenotettuna ja kierrätettynä nykyisen SER:n raaka-aineiden potentiaaliseksi arvoksi kuitenkin arvioidaan 48 miljardia euroa**. Sähkö- ja elektroniikkalaiteromun vuotuisen määrän ennustetaan kasvavan 53,6 miljoonasta tonnista lähes 75 miljoonaan tonniin vuonna 2030. SER uusioraaka-aineina ja -tuotteina voi vähentää CO_2-päästöjä merkittävästi. (Forti ja muut 2020)

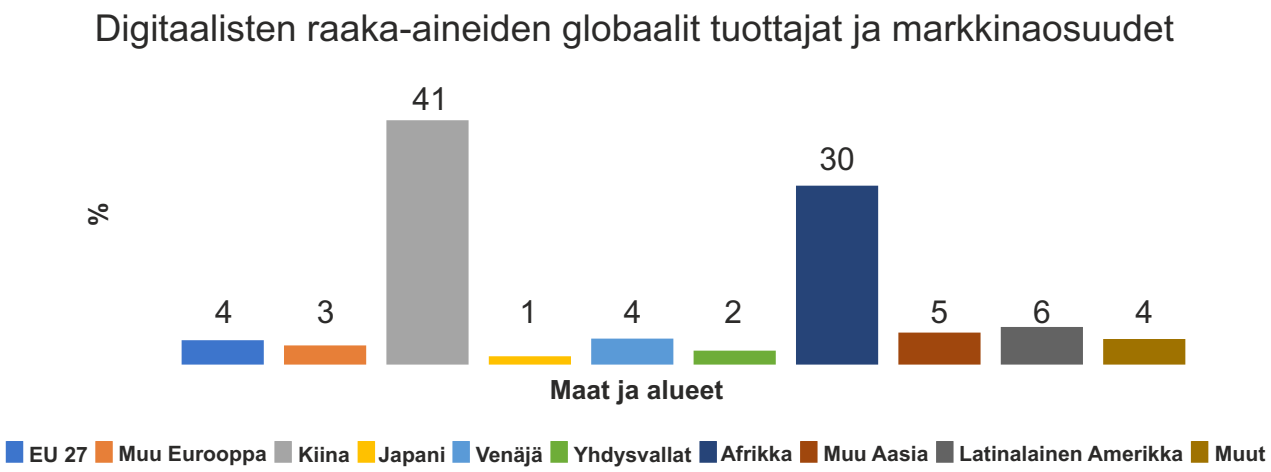
SER:a pidetään yhtenä ongelmallisimpana jätevirtana, sillä sen määrä on merkittävä ja sisältö osittain vaarallista, koska sisältää monia haitallisia aineita. EU:ssa kerätty SER koostuu suurista kotitalouslaitteista (52,7 %), viihde-elektroniikasta ja aurinkopaneeleista (14,6 %), IT- ja televiestintälaitteista (14,1 %), pienistä kotitalouslaitteista (10,1 %) ja muista elektronisista laitteista (8,4 %). SER:n kierrätys EU-alueella vaihtelee Kroatian 81,3 %:sta Maltan 20,8 %:iin. (European Parliament 2020)

Keskeisiä SER:n syntymiseen vaikuttavia tekijöitä ovat käytettävien tulojen korkeampi taso, kaupungistuminen, teollistuminen, sähkö- ja elektroniikkalaitteiden suurempi kulutus, lyhyet elinkaaret sekä tarjolla olevien korjausvaihtoehtojen rajallisuus. SER:n kierrätyksessä jokaisella tuotteella on erilainen materiaalisisältö, joten tuotteet myös hävitetään ja kierrätetään eri tavoin. Siksi tuotteiden haitat ympäristölle ja ihmisten terveydelle voivat nekin erota, ellei tuotteita käsitellä ympäristön kannalta kestävällä tavalla. (Forti ja muut 2020). Osa sähkö- ja elektroniikkalaiteromun haittavaikutuksista ulkoistetaan kehittyviin maihin laillisen tai laittoman jätekaupan kautta. Kehittyvissä maissa kunnollisen jätehuollon puute johtaa paikallisten asukkaiden altistumiseen ja paikalliseen saastumiseen. Sähkö- ja elektroniikkalaitteiden purkaminen tehdään usein lapsityövoimalla epäinhimillisissä olosuhteissa (Puckett ja muut 2018).

2 MINERAALIT JA METALLIT DIGITALISAATIOSSA

Digitaalisista teknologioista löytyy lähes koko alkuaineiden jaksollinen järjestelmä. Digitalisaatio käyttää varsinkin kuparia, galliumia, germaniumia, kultaa, indiumia, platinaryhmän metalleja (PGM), harvinaisia maametalleja (REE) ja tantaalia. Esimerkiksi UNCTAD (2020) kutsui galliumia, germaniumia, indiumia, harvinaisia maametalleja, seleeniä, tantaalia ja telluuria ”ICT-alkuaineiksi”. Ne ovat ”funktionaalisia alkuaineita” eli mikrosirujen, mikropiirien ja muiden ICT-laitteiden rakennuspalikoiden keskeisiä raaka-aineita. Kaiken metallintuotannon kokonaisarvo (kaivosvaiheessa) oli vuonna 2018 noin 660 miljardia dollaria. Rautamalmi, kulta ja kupari – tässä järjestyksessä – muodostivat yli 60 % summasta ja muut metallit 39 %. Seitsemän edellä mainittua ICT-alkuainetta vastasivat yhdessä vain 0,77 %:a (5 miljardia dollaria). Kivihiili ei ole mukana luvuissa (UNCTAD 2020). Tuotantomääriä tarkasteltaessa näiden seitsemän metallin osuus on vieläkin pienempi, sillä suurimmalla osalla niistä on verrattain korkea tonnihinta. Metallien kokonaistuotanto maailmanlaajuisesti oli vuonna 2018 noin 1 600 miljoonaa tonnia (metallisisältöä). Seitsemän alkuainetta muodosti tästä 0,17 miljoonaa tonnia, josta harvinaisia maametalleja (REE) oli noin 95 % (UNCTAD 2020). Kaikkia muita tuotetaan minimaalisia määriä: pienin on germaniumin vuosituotanto, noin 100 tonnia, ja suurin seleenin, jopa 3 000 tonnia. ICT-alkuaineet muodostavat siis vain murto-osan metallien kokonaiskäytöstä, mutta jopa 80–90 % näistä alkuaineista menee digitaalisen talouden käyttöön (Malmodin ja muut 2018). Harvinaiset maametallit ja tantaali ovat joidenkin kaivosten päätuotteita, mutta loput viisi ovat kupari-, bauksiitti-, lyijy–sinkki- tai hiilikaivosten sivutuotteita, jotka uutetaan vasta myöhemmissä sulatus- tai jalostusvaiheissa. ICT-alalle tärkeiden raaka-aineiden globaalit tuotanto-, varanto- ja varaluvut esitetään Taulukossa 2.

Tässä osiossa esitetyt digitaalisten teknologioiden raaka-ainetarpeet perustuvat seuraaviin lähteisiin: Bobba ja muut (2020), UNCTAD (2020), Marscheider-Weidemann ja muut (2016) ja Ku (2018). Yleisesti digitalisaatio ja datan kasvava varastointi voivat johtaa siihen, että joitakin kriittisiä raaka-aineita kuluu merkittävästi enemmän kuin nykyisin. Näitä ovat esimerkiksi palladium, germanium, gallium, dysprosium ja neodyymi. Robotisaation vaatimista 44:stä raaka-aineesta 19 on Euroon Unionille kriittisiä, ja joita tuotetaan pääasiassa Kiinassa, Etelä-Afrikassa ja Venäjällä. Kiina (41 %) ja Afrikan maat (30 %) ovat useiden digitalisaatiossa tarvittujen raaka-aineiden globaalisti hallitsevia tuottajia (Kuva 6).



Kuva 6. Globaalit avainmaat ja -alueet kriittisten digitaalisten raaka-aineiden toimitusketjussa ja niiden osuus globaalista tuotannosta, % (Bobba ja muut 2020). Mukana ovat seuraavat raaka-aineet: Hopea (Ag), kulta (Au), boori (B), luonnongrafiitti, koboltti (Co), kromi (Cr), kupari (Cu), rauta (Fe), gallium (Ga), germanium (Ge), indium (In), litium (Li), magnesium (Mg), mangaani (Mn), nikkeli (Ni), lyijy (Pb), platinaryhmän metallit (PGM), harvinaiset maametallit (REE), pii (Si), tina (Sn), strontium (Sr), titaani (Ti) ja volframi (W).

Taulukko 2. Tärkeimpien digitalisaatiossa käytettävien metallien tuotanto ja varannot (tonnia raaka-ainetta); tiedot vuodelta 2018, ellei muuten ilmoiteta. Globaalit ja EU-alueen varannot ovat varovaisia arvioita ja todennäköisesti merkittävästi pienempiä kuin kallioperässä tosiasiassa on. EU:n osalta esim. Romanian varantotiedot puuttuvat lähes kokonaan. Iso-Britannia ei ole mukana EU-luvuissa.

Kaivostuotanto					Varannot ja varat		
Metalli	**Globaali[1]**	**EU[2]**	**Suomi[3]**	**Tärkeimmät globaalit tuottajamaat[1,4]**	**Globaali[1]**	**EU[1,2,5,6]**	**Suomi[7]**
Al[1]	327 000 000	1 693 000	0	AUS (26 %), CHN, GUI, BRA	75 000 000 000	1 023 000 000	0
Cr	20 000 000	400 000	400 000	RSA (41 %), TUR, KAZ, IND	>5 000 000 000	50 000 000	45 700 000
Cu	20 400 000	906 927	46 674	CHI (29 %), PER, CNA, DRC, USA	2 100 000 000	21 000 000	5 242 400
Au	3 300	31	8,7	CNA (14 %), AUS, RUS, USA	50 000	1 370	579
Ga	300[11]	0	0	CNA (90 %)[11]	>1 000 000[12]	ei tiedossa	ei tiedossa
Ge	130[11]	0	0	CNA[11]	>35 000[12]	ei tiedossa	ei tiedossa
In	900[11]	0	0	CNA, KOR[11]	356 000	ei tiedossa	ei tiedossa
REE	206 400	0	0	CNA, USA, BUR	411 000 000	913 000	51 700
Se	2 900[11]	615	100	CNA, JPN[11]	>100 000[12]	ei tiedossa	ei tiedossa
Ta	1 700	14	0	DRC, BRA, RWA	>140 000[12]	600	477
Te	490[11]	45	0	CNA, JPN, RUS[11]	>31 000[12]	1 500	ei tiedossa
Ir	6,1	0	0	RSA (92 %)	ei tiedossa	0	0
Ni	2 400 000	62 172	43 572	INS (25 %), PHI, RUS, NCA	>130 000 000	9 900 000	5 637 000
Pd	199	1,58	1,58	RUS (40 %), RSA	7 200[5]	584	584
Pt	178	1,16	1,16	RSA (71 %), RUS	13 000[5]	260	260
Ru	27,1	0	0	RSA (93 %)	na	0	0
Si[8]	2 454 000	158 000	0	CNA (65 %), RUS, NOR, USA	hyvin suuri	suuri	suuri?
Ag	26 500	1 800	13	MEX (21 %), PER, CNA, RUS	560 000[9]	143 000	2 055
Sn	318 000	192	0	CNA (28 %), INS, BUR, PER	9 500 000	114 000	1 440

1 USGS (2021)
2 Brown ja muut (2021)
3 Tukes (2021)
4 AUS = Australia, BRA = Brasilia, BUR = Burma, CND = Kanada, CHI = Chile, CNA = Kiina, DRC = Kongon demokraattinen tasavalta, GUI = Guinea, IND = Intia, INS = Indonesia, JPN = Japani, KAZ = Kazakstan, KOR = Etelä-Korea, MEX = Meksiko, NCA = Uusi-Kaledonia, NOR = Norja, PER = Peru, PHI = Filippiinit, RSA = Etelä-Afrikka, RUS = Venäjä, TUR = Turkki
5 Eynard ja muut (2020), Latunussa ja muut (2020), Minerals4eu (2021); "ei tiedossa" tarkoittaa, että varantoja on olemassa, mutta niiden määriä ei tiedetä.
6 Eilu ja muut (2020)
7 Geological Survey of Finland (2021)
8 Piimetallin tuotanto piijalostamoista – kaivostuotantotietoja ei ole saatavilla. Raaka-aine on kvartsi, jonka varannot ovat hyvin suuria, mutta laatuvaihtelu suurta. Vain pieni osa kaikesta louhitusta kvartsista käytetään "piimetallina" metalliseosten ja elektroniikka-komponenttien valmistuksessa.
9 Pelkät malmivarat, varannot ovat paljon suuremmat.
10 Bauksiitti (alumiinimalmi); huomioi, että Kiina tuotti 61 % kaikesta jalostetusta alumiinimetallista.
11 Ga, Ge, In, Se ja Te: tiedot kertovat jalostustuotannosta, sillä kaivostuotannon tietoja ei ole saatavilla. **Ylivoimaisesti suurinta osaa louhitussa malmissa olevasta metallista ei oteta talteen näiden alkuaineiden osalta;** talteen otetaan näiden malmien (Al, Cu, Zn) päämetallit. Esimerkiksi ***germaniumista talteen otetaan vain noin 3 % metallista, sillä germanium on vain louhitun malmin potentiaalinen sivutuote.***
12 Tiedossa vain malmivarat ja vain pienestä osasta suurista metalliesiintymistä. Varannot ovat paljon suurempia, ja tämä pätee myös EU-alueen ja Suomen varantoihin. Galliumin tapauksessa luku on arvio bauksiittimalmeissa olevista varannoista. Oletettavasti galliumia on runsaasti myös sinkkimalmeissa.

Näiden teknologioiden osalta EU:lle keskeiset kriittiset raaka-aineet ovat kromi, koboltti, molybdeeni, luonnongrafiitti, nikkeli, magnesium, vanadiini, kupari, tina, antimoni ja vismutti (ibid.). 3D-tulostuksessa käytetään polymeerejä ja metallijauheita, esimerkiksi alumiinimagnesiumseoksia, titaania, nikkeliä ja ruostumatonta terästä. Lisäksi seoksissa käytetään myös kobolttia, hafniumia, niobiumia, magnesiumia, skandiumia, titaania, vanadiinia, volframia ja zirkoniumia.

Raaka-ainenäkökulmasta tarkasteltuna digitaalisella ICT-teollisuudella on kolme pääpiirrettä (Ku 2018):

- *Ensimmäiseksi:* Laajaa ja kasvavaa määrää eri alkuaineita käytetään siruissa ja laitteissa, jotta saavutetaan halutut elektroniset, magneettiset, optiset ja mekaaniset ominaisuudet.
- *Toiseksi:* Vuosittain tuotettu hyvin suuri siru- ja laitemäärä viittaa siihen, että vaikka yhdessä laitteessa käytetään alkuaineita vain pieniä määriä, materiaalimäärät nousevat hyvin suuriksi suhteessa nykyiseen tarjontaan.
- *Kolmanneksi:* Uusia teknologioita tuodaan markkinoille sykleissä, jotka ovat nopeampia kuin tuotantoketjun muihin osa-alueisiin liittyvät ajanjaksot.

ICT-laitteiden toimivuuden varmistamiseksi tärkeitä ovat myös sellaiset raaka-aineet, joita ei käytetä itse ICT-laitteissa, mutta jotka ovat tärkeitä yleiselle ja laitteisiin liittyvälle infrastruktuurille ja koneille. Myös nämä raaka-aineet voivat muuttua kriittisiksi tietojenkäsittelyn seuraavan sukupolven käyttöönoton kannalta. Esimerkiksi heliumin avulla luodaan absoluuttista nollapistettä lähentelevä matala käyttölämpötila, jota ICT-alalla tarvitaan kvanttilaskentateknologiassa sekä supra- ja puolijohteiden ja optisten kuitujen valmistuksessa (Eynard ja muut 2020). Korvaamisen ja kierrätyksen ansiosta heliumin kysyntää on pystytty vähentämään merkittävästi (Elsner 2019). Heliumin kysyntä on laskenut, ja siitä saadaan todennäköisemmin kiittää käyttäjien pelkoa uudesta raaka-ainepulasta kuin sitä, että jalokaasu ei enää kiinnostaisi alaa. Koetut lyhytaikaiset pullonkaulat voivat ainakin tällä hetkellä estää potentiaalisia käyttäjiä valitsemasta heliumia taas ensisijaiseksi teollisuuskaasuksi (Elsner 2019).

Digitaalisten verkkojen ja palveluiden globaali laajeneminen tarkoittaa, että yhä useammalla on internetyhteys. Tämä tarkoittaa, että tarvitaan yhä enemmän liitettyjä laitteita ja yhteysinfrastruktuuria, kuten sähkölaitoksia, sähköverkkoja ja kuituoptiikkaa. Joidenkin elektronisten laitteiden myynnin valtavasta kasvusta huolimatta niihin liittyvien kriittisten raaka-aineiden käyttö joko pysyy paikoillaan tai kasvaa varsin rajallisesti (esim. palladiumin, galliumin, dysprosiumin ja neodyymin; Bobba ja muut 2020). Tantaalia käytetään tällä hetkellä pääasiassa elektroniikassa, ja sen tapaus onkin kiinnostava: tantaalin käyttö yksin elektronisissa käyttökohteissa saattaa kasvaa metallin tämänhetkistä kokonaiskäyttöä suuremmaksi. Vastaavasti digitaalisten teknologioiden ja sähköisten näyttöjen (litteät kuvaruudut ja kosketusnäytöt mukaan lukien) kehitys on vauhdittanut indiumtinaoksidi- eli ITO-ohutkalvoissa käytetyn indiumin kulutusta. Vuosina 1993–2013 indiumin primäärituotanto kasvoi yli viisinkertaiseksi (Tercero 2019). Indium on yksi niistä raaka-aineista, joiden merkitys kasvaa. Syitä tähän ovat sen verrattain suuri taloudellinen merkitys, korvaavien aineiden puute, louhinta kantajametallien sivutuotteena, jalostamoiden nykyisten prosessien matala talteenottotehokkuus sekä olematon kierrätys laitteiden elinkaaren lopussa (Werner ja muut 2015, Frenzel ja muut 2017, Ciacci ja muut 2019). Indium on ongelmallinen myös siksi, että harvat jalostamot ovat kiinnostuneita, osa ei lainkaan, ottamaan metallia talteen sinkkimalmeista, joissa sitä olisi eniten. Sama pätee myös galliumiin ja germaniumiin. Globaalisti arvioidaan, että vain noin 3 % sinkkimalmeissa olevasta germaniumista otetaan talteen (USGS 2021).

ICT-alalle tärkeiden raaka-aineiden tämänhetkinen globaali sekä EU:n ja Suomen kysyntä esitetään Taulukossa 3.

Taulukko 3. Tärkeimpien digitalisaatiossa käytettyjen metallien kysyntä, tuonti ja kierrätys EU:ssa; tiedot vuodelta 2018, ellei muuten ilmoiteta. Iso-Britannia ei ole mukana EU-luvuissa. Suomen elektroniikkateollisuuden kysynnän tietoja ei ole saatavilla. Tärkeimmät tietolähteet ovat Eynard ja muut (2020), Latunussa ja muut (2020) ja USGS (2021). EoL = Käyttöiän lopussa olevat tuotteet.

Metalli	Globaali kysyntä	EU:n kysyntä	EU:n ICT-kysyntä[1]	Tuonnin kattama EU:n kysyntä	EU:n malmi- ja rikaste-tuonti[2]	EU:n jalostetun metallin päälähteet[2]	Kierrätetyn metallin osuus globaalista kokonais-kysynnästä	Globaali EoL-kierrätys-aste[3]
Al[4]	327 000 000	15 400[4]	1 500[5]	89 %[4]	GUI, BRA	RUS, GER, MOZ, FRA	35 %	60–90 %
Cr	20 000 000	1 200 000	<1 %	55 %	RSA, TUR	RSA, FIN[6]	35 %?[6]	>50 %
Cu	24 500 000	2 570 000	385 500	69 %	CHI, PER, BRA	GER, PLD, SPA, BEL	32 %	17 %
Au	4 400	300	33	91 %	?	?	23 %	20–30 %
Ga	300	27	27	100 %[10]	?	UK, CNA	10–25 %	0 %
Ge	130	39	34	100 %	ei ole	CNA, UK, RUS, USA	30 %	2 %
In	900	30	27	100 %[10]	ei ole?	FRA, BEL, UK, CNA	25–50 %	1 %
REE	200 000	4 000	460	100 %	ei ole	CNA, RUS	>1 %	<1 %
Se	2 900	1 200	120	25 %	ei ole	GER, BEL	<1 %	0 %
Ta	1 700	400	300	100 %	DRC, RWA, BRA	ei ole	30 %	0 %
Te	490	27	22	70 %?	?	UKR, ?	?	<1 %
Ir	7,5	0,9	?	100 %	RSA	RSA, UK	14 %	20–30 %
Ni	2 300 000	330 000	33 000?	70 %	RSA, CND, BRA	RUS, FIN, UK, NOR	35 %	83 %[7]
Pd	290	59	2,4	99 %	RUS, RSA	RUS, RSA, CND	29 %	60–70 %
Pt	255	64	0,6	98 %	RSA, RUS	RSA, UK	27 %	60–70 %
Ru	33,5	2,5	1,2	100 %	RSA	RSA, UK	11 %	5–15 %
Si	2 500 000	433 000	8 500	64 %	?[8]	NOR, FRA, CNA, BRA, GER, SPA	2 %?	0 %?
Ag	30 848	5 261	310	64 %	MEX, PER, ARG	GER, ITA, FRA, BEL	17 %[9]	10–15 %
Sn	371 000	37 300	18 000	100 %	USA, THA	BEL, UK, PER, MLY, PLD	31 %	40 %

1 Kysyntä kaikessa elektroniikassa; EU: nikkeli epävarma, iridiumista ei tietoja

2 Alenevassa merkitysjärjestyksessä; ARG = Argentiina, BEL = Belgia, BRA = Brasilia, CHI = Chile, CNA = Kiina, CND = Kanada, FIN = Suomi, FRA = Ranska, GER = Saksa, GRE = kreikka, GUI = Guinea, ITA = Italia, MEX = Meksiko, MLY = Malesia, MOZ = Mosambik, PER = Peru, PLD = Puola, POR = Portugali, RSA = Etelä-Afrikka, RUS = Venäjä, RWA = Ruanda, SPA = Espanja, SWE = Ruotsi, THA = Thaimaa, TUR = Turkki, UK = Iso-Britannia, UKR = Ukraina

3 Tämä luku ei sisällä raha- ja korumetallien kierrätystä, ja prosentti on ilmeisesti paljon matalampi ICT:n osalta (PGE, Au, Ag). Kierrätysaste vaihtelee muiden EoL-tyyppien välillä kaikkien metallien osalta.

4 Bauksiitti (alumiinimalmi); kierrätysasteet liittyvät alumiinimetalliin; bauksiittia ei voi kierrättää

5 Sisältää kaikkien sähkölaitteiden, johdinten ja kaapelien kysynnän, pelkän ICT:n kysyntä paljon pienempi

6 Ferrokromin (56 % Cr) lähde jalostetun metallin sijaan, sillä jalostetun metallin kysyntä on <1 % kromin kokonaiskysynnästä. Ruostumattoman romuteräksen saatavuus on paljon EU:n sisäistä kysyntää matalampi, ja siksi EU tuo myös romumetallia.

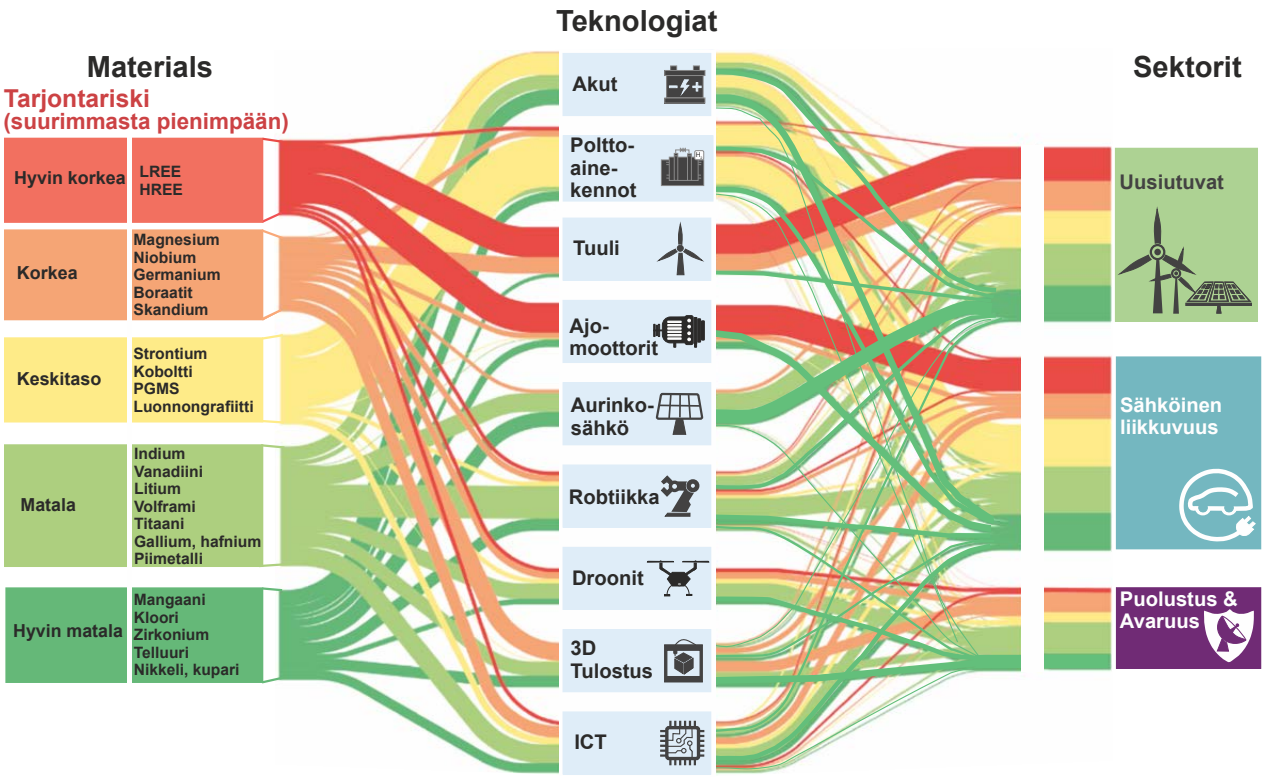
7 Nickel Institute (2021)

8 Ei ole tiedossa, paljonko erittäin puhdasta kvartsia tuodaan piimetallin tuotantoa varten. Joka tapauksessa suurin osa EU:ssa piiksi prosessoitavasta kvartsista on EU-alkuperää.

9 Silver Institute (2020).

10 Tämä koskee jalostettua metallia, sillä malmin ja rikasteen tuontimääriä ei tiedetä.

Elektronisiin käyttökohteisiin etsitään tilalle paremmin suoriutuvia ja halvempia materiaaleja ja komponentteja, mikä vaikuttaa kriittisten raaka-aineiden kysyntään ja saattaa joko tasata kysynnän tai lisätä sitä entisestään (REE, tantaali ja palladium elektronisissa laitteissa ja käyttökohteissa; germanium optisten kuitujen osalta; Tercero, 2019). Ku (2018) arvioi, että globaali datan varastointi tulee vaatimaan jopa 80 000 tonnia neodyymia, mikä on noin 120-kertaisesti metallin tämänhetkinen vuosikysyntä EU:ssa. Nousevien teknologioiden käyttö nykyisten sijaan, esimerkiksi ferrosähköisen RAMin eli FRAMin käyttö kasvavien datamäärien varastoinnissa, vaatisi jopa 40 000 tonnia platinaa. Tämä on EU-tasolla 680-kertaisesti nykyistä vuosikysyntää suurempi ja globaalisti 140-kertainen. Tällaiset määrät ja kasvu huomioiden on hyvä muistaa, että muut sektorit kilpailevat ICT-alan kanssa samoista raaka-aineista, prosessoiduista materiaaleista sekä komponenteista (Kuva 7). Tämä pätee esimerkiksi boraatteihin, galliumiin, indiumiin, harvinaisiin maametalleihin, kobolttiin, niobiumiin, piimetalliin ja muihin kriittisiin raaka-aineisiin. Mineraaliraaka-aineiden kauppaa käydään kansainvälisillä markkinoilla, ja USA:n ja Kiinan kaltaiset avainvaltiot ovat riippuvaisia joidenkin raaka-aineiden tuonnista (esim. niobium, kromi ja tantaali). Siksi niiden saatavuus EU:ssa voi muuttua entistä haasteellisemmaksi. Maailman eri alueiden välinen kilpailu raaka-aineista muuttuu entistä kovemmaksi, kun teollisuusstrategiat muuttuvat ja siirrytään kohti vähähiilistä taloutta.



Kuva 7. Semikvantitatiivinen esitys raaka-ainevirroista ja tämänhetkisistä saantiriskeistä, joita ne aiheuttavat yhdeksälle valitulle teknologialle ja kolmella talouden sektorilla (perustuu 25 valikoituun raaka-aineeseen, joita tarkasteli Bobba ja muut 2020). PV = aurinkokennot.

Esimerkiksi sähköautojen ja tuulivoimaloiden valmistukseen tarvitaan kasvavia määriä neodyymia ja platinaryhmän metalleja ('PGMS', Kuva 7). Neodyymi kuuluu harvinaisiin maametalleihin, ja siksi arvioidaankin, että neodyymista ei tulisi pulaa, koska sitä tuotetaan muiden metallien sivutuotteena. Suurin osa siitä (60 %) kuitenkin tuotetaan Kiinassa, joka voi milloin hyvänsä rajoittaa tarjontaansa (UNCTAD 2020).

Edellä esitetyt trendit ovat Bobban ja muut (2020) esittämien mukaisia suhtautuen digitalisaatioon ja teknologian kehitykseen varsin maltillisesti. Muissa tutkimuksissa arvellaan, että näiden materiaalien kulutus tulee tulevaisuudessa kasvamaan paljon enemmän, kun tuotantoinfrastruktuuria päivitetään ja uusia laitteita, antureita ja ohjaimia käytetään entistä enemmän (Bonilla ja muut 2018). Tarjonnan riskit voivat nousta myös siksi, että

ICT-teknologioiden kriittisten raaka-aineiden kierrätyspotentiaali on lähitulevaisuudessa suurilta osin rajallista tai mahdotonta (Marcheider-Weidemann ja muut 2016). Geologisesti maankuoressa ei kuitenkaan ole pulaa ICT-alkuaineista (UNCTAD 2020). Gallium-, germanium- ja indiumvarat ja -varannot ovat valtavia. Niitä on kaikissa bauksiitti- (alumiinin tuotanto), sinkki- ja kuparimalmeissa, joita kaikkia tuotetaan miljoonia tonneja vuodessa ja on siis saatavilla valtavia määriä. On myös tärkeää ottaa huomioon, että vaikka ICT-ala kilpailee muiden sektoreiden kanssa samoista raaka-aineista, ICT:n tarvitsema määrä on vain 0,5 %. Tämä johtuu siitä, että näitä raaka-aineita käytetään ICT-laitteissa vain hyvin pieniä määriä. Kuten edellä todettiin, raaka-aineiden kysynnän odotetaan kuitenkin kasvavan huomattavasti parissa vuosikymmenessä. Yleisesti seitsemän tärkeimmän ICT-alkuaineen tarjontaa ei silti nähdä ongelmana (UNCTAD 2020). Primaarituotteiden kokonaismäärästä voisi potentiaalisesti tuottaa merkittävästi enemmän ICT-alkuaineita kuin tällä hetkellä malmeista erotetaan. Tarvittavat absoluuttiset tuotantomäärät ovat niin pieniä, että näiden seitsemän alkuaineen tulevaisuudessa suurikin kysynnän kasvu on realistista kattaa lyhyellä aikajänteellä ja rajallisilla investoinneilla, mutta harvinaiset maametallit saattavat olla poikkeus (UNCTAD 2020). Taulukko 4 näyttää ICT-alalla tärkeiden alkuaineiden globaalin louhinnan, minimivarannot ja kysyntävuodet tunnettujen varantojen perusteella. Taulukosta näkee, että useiden alkuaineiden kysyntä voi jatkua pitkään ennen kuin tunnetut varannot loppuvat, mutta joidenkin tapauksessa varannot ehtyvät jo parissa vuosikymmenessä.

Taulukko 4. Tärkeimpien digitalisaatiossa käytettävien metallien globaalin kaivostuotannon ja globaalien tunnettujen varantojen välinen suhde (tonnia raaka-ainetta) sekä laskelma siitä, kuinka kauan tällä hetkellä tunnetut varannot riittävät tämänhetkisellä louhintavolyymillä. 2020 tiedot: USGS (2021). Varantotiedot ovat varovaisia arvioita ja todennäköisesti merkittävästi pienempiä kuin maaperästä tosiasiassa on hyödynnettävissä.

Metalli	Globaali louhinta	Globaalit varannot vähintään[1]	Globaali varantojen riittävyys, vuosia
Al	327 000 000	75 000 000 000	229
Cr	20 000 000	5 000 000 000	250
Cu	20 400 000	2 100 000 000	103
Au	3 300	50 000	15
Ga[2]	300	1 000 000	3 333
Ge[2]	130	35 000	269
In[2]	900	356 000	396
REE	206 400	411 000 000	1 991
Se[2]	2 900	100 000	34
Ta	1 700	140 000	82
Te[2]	490	31 000	63
Ir[1]	6,1	700	115
Ni	2 400 000	130 000 000	54
Pd	199	7 200	36
Pt	178	13 000	73
Ru[1]	27,1	700	26
Si[1,3]	2 454 000	100 000 000 000	40 750
Ag	26 500	560 000	21
Sn	318 000	9 500 000	30

1 Globaalien iridium- ja ruteniumvarantojen oletuksena 10 % palladiumvarannoista; globaalit piivarannot varmasti suuremmat kuin globaalit alumiinivarannot

2 Ga, Ge, In, Se ja Te: tuotantotiedot kertovat jalostustuotannosta, sillä kaivostuotannon tietoja ei tunneta. Kaikista näistä ylivoimaisesti suurinta osaa louhitussa malmissa olevasta metallista ei saada talteen; talteen otetaan näiden malmien päämetallit alumiini, kupari ja sinkki. Esimerkiksi germaniumista talteen otetaan vain noin 3 %, sillä germanium on louhitun malmin potentiaalinen sivutuote.

3 Piimetallin tuotanto piijalostamoista – kaivostuotantotietoja ei ole saatavilla. Raaka-aine on kvartsi, jonka varannot ovat hyvin suuria, mutta laatuvaihtelu suurta. Vain pieni osa kaikesta louhitusta kvartsista käytetään "piimetallina" seosten ja elektroniikkakomponenttien valmistuksessa.

ICT-alan ja muiden kilpailevien sektoreiden primaariraaka-aineiden saatavuuden suurimpia ongelmia onkin voimakas tuontiriippuvaisuus tietyistä päälähteistä. Tilanne voi kuitenkin olla ilmeisempi sähköisen liikkuvuuden ja uusiutuvan energian sektoreilla, jotka tarvitsevat raaka-aineita ICT-alaa suurempia määriä. Riittämätön tuotanto voi vaarantaa vihreän siirtymän tavoitteet ja pakottaa etsimään muita ratkaisuja hiilineutraaliuden saavuttamiseen (ks. IEA 2021, Michaux 2021).

2.1 Nykykäyttö ja raaka-aineiden tuotanto digitalisaatiossa

Digitalisaatiossa käytetyt mineraalit voidaan jakaa kolmeen ryhmään niiden käyttötapojen mukaan (Taulukko 2): 1) Teknologiakriittiset metallit 2) Akkumetallit ja -mineraalit sekä 3) Muut metallit, alkuaineet ja mineraalit. Jaottelu on kuitenkin jossain määrin sattumanvarainen, sillä jotkin raaka-aineet, kuten koboltti, kromi, kupari, grafiitti ja nikkeli, kuuluvat useampaan ryhmään.

Nykyiselle ja ennustetulle digitaaliselle teknologialle olennaiset alkuaineet ja mineraalit esitetään seuraavassa ryhmittäin listattuna. Ne perustuvat Eynardin ja muiden (2020) ja Latunussan ja muiden (2020) raportteihin.

2.1.1 Teknologiakriittiset metallit

Korkean teknologian kannalta kriittisiä eli high tech -metalleja ovat esimerkiksi gallium, germanium, niobium ja tantaali (Taulukko 2). Ne ovat keskeisessä roolissa, kun kehitetään nousevia avainteknologioita, kuten uusiutuvaa energiaa, energiatehokkuutta, elektroniikkaa tai avaruusteollisuutta. Näitä metalleja esiintyy maankuoressa vain pienissä tai hivenpitoisuuksissa. Niiden pitoisuuskeskiarvo vaihtelee <0,1 miljardisosasta (1 miljardisosa = 0,0000001 %) useaan sataan miljoonasosaan (1 miljoonasosa = 0,0001 %), ja niitä löytyy yleensä, mutta ei aina, vain harvoista mineraaliesiintymistä niin merkittävinä konsentroitumina että niiden talteenotto kannattaa. Suurin osa niistä myös otetaan talteen keskeisten metallimalmien sivutuotteena. Tästä poikkeuksena ovat kromi, grafiitti ja nikkeli, joita louhitaan lähes aina oman esiintymänsä pääraaka-aineena. Korkean teknologian metallit ja niiden digitaalisen teknologian käyttötavat luetellaan Taulukossa 5.

Taulukko 5. Korkean teknologian raaka-aineet ja niiden käyttö digitalisaatiossa (Bobba ja muut 2020).

Raaka-aine	Käyttö digitaalisessa teknologiassa
Boori (B)	Puolijohteet ja HDD-kestomagneetit
Kromi (Cr)	Sähkökomponenttien alustat ja pinnoitus
Koboltti (Co)	HDD:t, puolijohteet ja mikropiirit
Gallium (Ga)	Puolijohteet, LED-valot, Blu-Ray- ja matkapuhelinpuolijohteet
Germanium (Ge)	Valokuitukaapelit, infrapunaoptiikka (yönäkö), puolijohteet
Grafiitti (C)	Grafeeni
Indium (In)	Näytöt (indiumtinaoksidina)
Magnesium (Mg)	Suuren lujuuden alumiinimagnesiumseokset
Nikkeli (Ni)	Alustat ja ruosteenestopinnoitukset
Niobium (Nb)	Puolijohdemagneetit
Harvinaiset maametallit (REE)	Magneetit, HDD:t, näytöt, LEDit, laserit, piirilevyt, muistit
Tantaali (Ta)	Kondensaattorit
Tallium (Th)	Puolijohteet, kuituoptiikka
Volframi (W)	Lämmönkestävät seokset mikropiireissä, dielektrisissä materiaaleissa ja transistoreissa, tyhjiöputkifilamentit

2.1.2 Akkumineraalit

Akkumetallit ovat akuissa usein käytettyjä metalleja tai mineraaleja (Taulukko 6). Näitä tarvitaan varsinkin litiumioniakuissa, jotka ovat ratkaisevan tärkeitä kannettavissa kahdensuuntaisissa viestintävälineissä ja tietojenkäsittelylaitteissa. Akun katodina käytetään litiumia, kobolttia, nikkeliä, mangaania ja alumiinia ja anodina pääasiassa grafiittia. Jonkin verran litiumia käytetään myös akun elektrolyytissä.

Kannettavissa laitteissa käytettäviin akkutyyppeihin vaikuttaa ennen kaikkea käytettävissä olevan tilan rajallisuus. Akkutyyppien energiatiheyden tulee siis olla korkea. Tällaisia akkutyyppejä ovat litiumkobolttioksidi ($LiCoO_2$) eli LCO, litiumnikkelimangaanikobolttioksidi ($LiNiMnCoO_2$) eli NMC ja litiumnikkelikobolttialumiinioksidi ($LiNiCoAlO_2$) eli NCA.

Samat metallit ja mineraalit ovat suurilta osin tärkeitä myös sähköisten kulkuneuvojen akuissa. Akkujen kokoonpanossa on kuitenkin eroa, sillä sähköautoissa tilaa on enemmän ja pientä kokoa tärkeämpää on akun pitkä käyttöaika (Buchman 2021).

Taulukko 6. Akkuraaka-aineet ja niiden käyttötavat digitalisaatiossa (Bobba ja muut 2020).

Raaka-aine	Käyttö digitaalisessa teknologiassa
Koboltti (Co)	Katodissa LCO-, NMC- ja NCA-tyyppien akuissa
Grafiitti (C)	Anodi kaikissa akkutyypeissä
Litium (Li)	Katodissa ja elektrolyytissä
Mangaani (Mn)	NMC-akun katodissa
Nikkeli (Ni)	Katodissa NMC- ja NCA-tyyppien akuissa
Vanadiini (V)	Kiinteissä akuissa, mutta ei kannettavissa laitteissa tai sähköautojen akuissa

2.1.3 Muut metallit

Kolmas ryhmä, ”muut metallit”, on suuri ja heterogeeninen ryhmä erilaisia metalleja ja alkuaineita, joita käytetään yleisesti elektroniikassa ja muissa digitaalisissa ratkaisuissa. Tämä ryhmä koostuu ICT- ja muiden laitteiden rakenteissa käytetyistä perusmetalleista (alumiini, kromi, kupari, nikkeli), jalometalleista (kulta, hopea, platinaryhmän alkuaineet) sekä muutamasta erittäin merkittävästä erityisalkuaineesta, kuten piimetallista. Tämän ryhmän alkuaineet luetellaan Taulukossa 7.

Taulukko 7. Muut raaka-aineet ja niiden käyttötavat digitalisaatiossa (Bobba ja muut 2020).

Raaka-aine	Käyttö digitaalisessa teknologiassa
Alumiini (Al)	Laitteiden kuoret ja rungot, johdot, kaapelit
Kromi (Cr)	Kuoret ja rungot ruostumattomasta teräksestä
Kupari (Cu)	Pääasiallinen johdemetalli elektroniikassa, liittimissä, muuntajissa, painetuissa piireissä, kaapeleissa, johdoissa, koskettimissa, mikropiireissä ja puolijohteissa
Kulta (Au)	Liittimet, kytkin- ja relekoskettimet, juotesaumat, liitäntäjohdot ja -liuskat, muistisirut ja piirilevyt
Iridium (Ir)	Upokkaat yksittäiskiteiden kasvattamiseen lasereita, skannereita, LEDejä ja akustisten pinta-aaltojen (SAW) suodattimia varten sekä muihin käyttötarkoituksiin; OLED-näytöt
Nikkeli (Ni)	Kuoret ja rungot ruostumattomasta teräksestä
Palladium (Pd)	Monikerroksiset keraamiset kondensaattorit, LCD:t, painetut piirilevyt. Tulevaisuudessa käyttö mikrosähkökondensaattoreissa voi olla merkittävää
Platina (Pt)	Painetut piirilevyt, näyttöjen lasi, muistit
Rutenium (Ru)	Termostaattien ja releiden sähkökoskettimet, levyasemat
Pii (Si)	Puolijohteet, transistorit, painetut piirilevyt ja mikropiirit, tietokonesirut
Hopea (Ag)	Juotto- ja kovajuottoseokset, painetut piirilevyt, herkät järjestelmät ja erikoistunut elektroniikka, jossa ensisijaista on suuri johtavuus lyhyellä välimatkalla, sähkökoskettimet, kytkimet ja passiiviset sähkökomponentit, esim. monikerroksiset keraamiset kondensaattorit, 5G-laitteet
Tina (Sn)	Juotteet

2.2 EU digitalisaation vaatimien luonnonvarojen tuotanto ja kysyntä globaalissa kontekstissa

Raaka-aineet ovat EU:n talouden kaikkien sektorien keskeinen mahdollistaja. Digitaaliset teknologiat vaativat useita raaka-aineita, jotka EU on luokitellut kriittisiksi raaka-aineiksi (Bobba ja muut 2020). Kriittiset raaka-aineet ovat raaka-aineita, joilla on suuri taloudellinen merkitys EU:n teollisuudelle ja joiden saantiriski on korkea. Osa raaka-aineista, varsinkin kriittisiksi arvioidut (European Commission 2020c), ovat olennaisia edellytyksiä sille, että uusiutuvaa energiaa, sähköistä liikkuvuutta, puolustus- ja avaruusteollisuutta, digitaalista teollisuutta ja muita strategisia sektoreita voidaan kehittää.

Poliitikot ja teollisuus ovat hyväksyneet kriittisyyden ja kriittisten materiaalien käsitteet ja alkaneet käyttää niitä, minkä ansiosta näihin alkuaineisiin liittyvät, tulevaan kysynnän ja tarjonnan väliseen epätasapainoon liittyvät riskit otetaan esille jo kehityssyklin varhaisessa vaiheessa. Euroopassa, Kiinassa, Japanissa ja Yhdysvalloissa on aloitettu laajoja tutkimus- ja kehitysohjelmia, joilla pyritään valottamaan kriittisten alkuaineiden kysynnän ja tarjonnan kaikkia mahdollisia puolia. Tutkimusaiheisiin kuuluvat mahdollisten korvaajien etsiminen, tarjonnan kasvattamisen tavat ja se, miten vaihtoehtoisia teknologioita voitaisiin saada käyttöön ja välttyä siten tulevilta raaka-ainepulilta ja niistä johtuvilta hintojen vaihteluilta. Näillä toimilla toivottavasti onnistutaan vähentämään riskejä. Parempi kierrätysaste vaikuttaa myös neitseellisten raaka-aineiden kysyntään, ja koska vastuullisuutta painotetaan nykyään huomattavasti, nämä näkökohdat ovat myös entistä tärkeämpiä. Nykyään EU:n teollisuus on useiden raaka-aineiden osalta suurilta osin tuonnista riippuvainen ja joissain tapauksissa hyvin altis tuotantoketjun haavoittuvuuksille (Bobba ja muut 2020). Tämä koskee erityisesti digitalisaatiota (Taulukot 2 ja 3). Eurooppa on myös riippuvainen muista maista (pääasiassa Kaakkois-Aasiasta), mitä tulee korkean teknologian komponentteihin ja -kokoonpanoon (Bobba ja muut 2020). Globaaleja esimerkkejä tästä ovat äskettäinen Suezin kanavan tukkeutuminen (vaikka este oli kanavassa vain muutaman viikon), koronapandemia ja Taiwanin vakava vesipula, jotka keskeyttivät globaalin valmistusteollisuuden mikrosirutoimitukset.

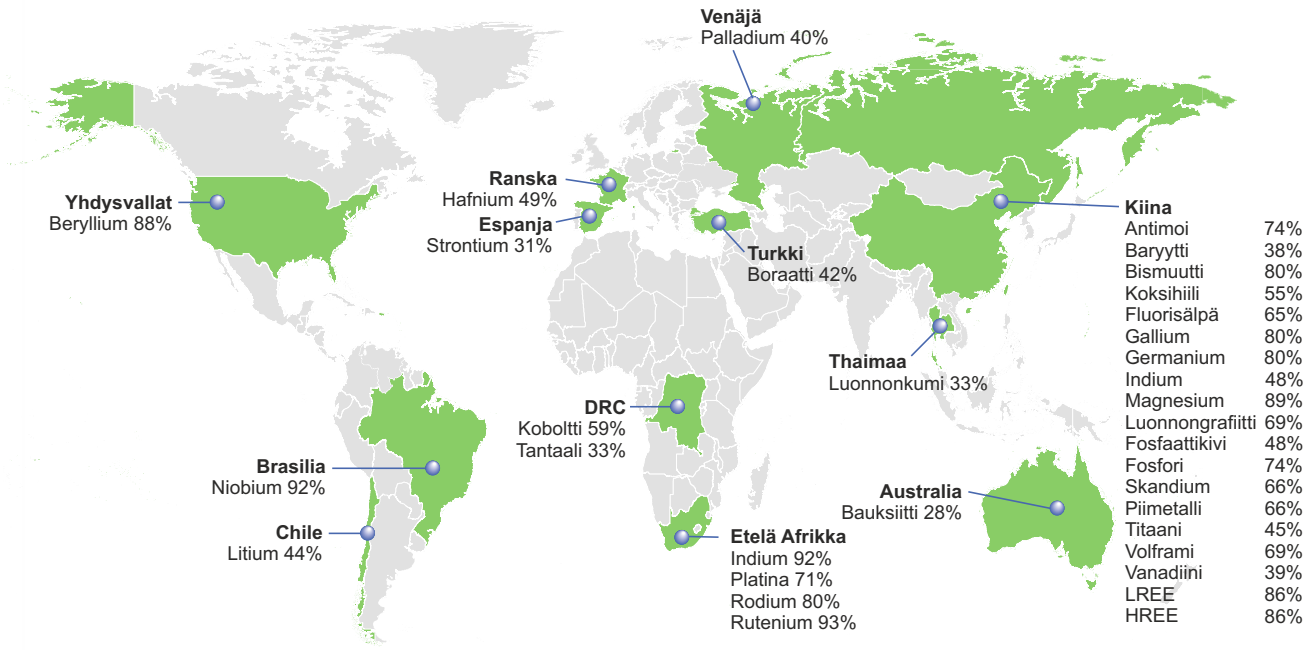
Kuten Taulukko 2 näyttää, EU tuottaa osan digitalisaatiossa käytettävistä tärkeistä raaka-aineista, ja myös varantoja ja varoja on EU:ssa. Suomi tuottaa pienehkön osan näistä raaka-aineista, ja Suomella on myös joidenkin keskeisten metallien ja mineraalien varantoja ja varoja. Taulukon 2 mukaan EU:n raaka-ainepula on erityisen ilmeistä alumiinin, iridiumin ja ruteniumin osalta sekä suurimmassa osassa ICT-alkuaineita. Sama koskee Suomea, jossa joukkoon lisätään vielä strontium ja tina. Kuten on jo mainittu, tärkeimmät globaalit tuottajat ovat EU:n ulkopuolella.

Taulukko 3 näyttää EU:ssa digitalisaatioon käytettyjen metallien kysynnän, tuonnin ja kierrätyksen. Se osoittaa, että EU on vahvasti riippuvainen tuontiraaka-aineista, jotka muodostavat yli 50 % kaikista ICT-alalla käytetyistä raaka-aineista. Tuonnin osuus kysynnästä on erityisen korkea (70–100 %) tietyillä metalleilla (alumiini, nikkeli, palladium, platina) sekä tietysti niissä, joita ei tuoteta lainkaan EU:ssa. Nämä on mainittu edellä, ja ennen kaikkea kyse on ICT-raaka-aineista.

Kierrätys kattaa noin 2–35 % globaalista kokonaiskysynnästä. Käyttöiän lopussa olevien tuotteiden (EoL) globaali kierrätysaste (RR) vaihtelee 0 %:sta (Si) 90 %:iin (Al). Nikkelin, platinaryhmän metallien ja kromin kierrätysaste on varsin korkea (>50–83 %), kun taas kuparia, ruteniumia, hopeaa ja piitä kierrätetään joko vähän tai ei ollenkaan (noin 0–17 %). Useiden ICT-alkuaineiden kierrätysastetta ei tiedetä. Siksi kierrätys ei ainakaan tällä hetkellä voi korvata primäärituotantoa. Koska digitalisaatio kuitenkin kuluttaa vain 0,5 % raaka-aineista verrattuna muihin teollisuuden sektoreihin, kierrätys voisi olla toimiva vaihtoehto, kun halutaan vähentää ICT-alan (usein tuotujen) primaariraaka-aineiden tarvetta ja lisätä EU:n raaka-aineomavaraisuutta. ICT-sektorin on kuitenkin kilpailtava muiden tuotantosektorien kanssa samoista raaka-aineista, eikä se siksi voi nojata yksin omaan kierrätykseen.

Taulukoissa 5 ja 6 esitetyn tilanteen tulkinnassa auttaa kartta globaalista luonnonvaratuotannosta (Kuva 8). Kuten edellä kävi ilmi, ja jonka myös Kuva 7 näyttää, suurin osa digitalisaation raaka-aineista tulee ulkomailta, pääasiassa Kiinasta ja Afrikasta, ja useat näistä ovat kriittisiä raaka-aineita.

Bobba ja muut (2020) tarkastelivat 25 tärkeimmän raaka-aineen saantiriskejä useilla EU:n teollisuussektoreilla, sekä kriittisten että ei-kriittisten materiaalien suhteen. Näistä digitaaliselle teollisuudelle valittiin 16 tärkeintä raaka-ainetta, jotka on lueteltu Taulukossa 8 saantiriskitasoineen.



Kuva 8. Hallitsevat kriittisten raaka-aineiden (CRM) tuottajat ja näiden osuus globaalista tuotannosta (Blengini ja muut 2020). Nämä ovat EU:n kriittiset raaka-aineet. Huomaa myös, että tiedot ovat vuodelta 2016, ja sen jälkeen on tapahtunut muutama merkittävä muutos. Esimerkiksi Australia on vienyt Chilen paikan suurimpana litiumin-tuottajana, Kiinan osuus harvinaisten maametallien (REE) tuottajana on laskenut noin 65 %:iin, ja Myanmarin osuus HREE-tuotannosta on epäselvä (USGS 2021).

Taulukko 8. 16 tärkeintä digitaalisissa teknologioissa käytettyä kriittistä ja ei-kriittistä raaka-ainetta, laskevassa saantiriskijärjestyksessä (mukaillen: Bobba ja muut 2020). Kevyet harvinaiset maametallit (LREE) ja platinaryhmän metallit (PGM) ovat metalleja, joiden kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet ovat hyvin samankaltaisia ao. ryhmien sisällä. Huomaa, että myös ”matala” saantiriski on kriittisen rajan yläpuolella, kun taas ”hyvin matala” on rajan alapuolella. Kromin, mangaanin ja zirkoniumin kriittisyys on vain hieman rajan alapuolella.

Alkuaine	Saantiriski
LREE	Hyvin korkea
Magnesiummetalli (Mg)	Hyvin korkea
Germanium (Ge)	Korkea
Boraatit (B)	Korkea
Koboltti (Co)	Keskitaso
PGM	Keskitaso
Luonnongrafiitti	Keskitaso
Vanadiini (V)	Matala
Titaani (Ti)	Matala
Gallium (Ga)	Matala
Pii (Si)	Matala
Mangaani (Mn)	Hyvin matala
Kromi (Cr)	Hyvin matala
Zirkonium (Zr)	Hyvin matala
Hopea (Ag)	Hyvin matala
Kupari (Cu)	Hyvin matala

Materiaalien kriittisyys koskee eurooppalaista teollisuutta laajemmin, mutta useat kriittiset raaka-aineet ovat erityisen tärkeitä ICT-laitteiden ja kehittyneen elektroniikan kannalta. Euroopan riippuvuus ulkomaisista digitaalisista komponenteista ja teknologiasta kasvaa, kun sen digitaalisten avainteknologioiden tuotanto vähenee. Vuonna 2017 **Euroopan kauppavaje korkean teknologian komponenttien ja -tuotteiden osalta oli 23 miljardia euroa,** suurilta osin merkittävän Kiinan-tuonnin vuoksi (European Political Strategy Centre 2019). Bobba ja muut (2020) toteuttivat semikvantitatiivisen analyysin, joka osoittaa, että näissä teknologioissa käytettävien kriittisten raaka-aineiden (esim. palladium, gallium, dysprosium ja neodyymi) kulutus EU-alueella kasvaa lähitulevaisuudessa.

EU pyrkii saavuttamaan teknologisen suvereniteetin joillain kriittisillä digitaalisilla alueilla (esim. lohkoketju, kvanttilaskenta ja datan jakaminen). Digitaalisten teknologioiden teknologinen suvereniteetti vaatii, että EU:lla on käytössään avainraaka-aineita ja prosessoituja materiaaleja ja että keskeisten digitaalisten komponenttien EU-alueen valmistus- ja kokoonpanomahdollisuuksia ryhdytään taas kehittämään. Vaatii merkittäviä tutkimus- ja kehitysinvestointeja, jotta EU pysyy muiden maiden ja alueiden tahdissa. EU:n on myös kehitettävä voimakkaasti komponenttien ja kokoonpanojen valmistusmahdollisuuksia.

Kuten Bobba ja muut (2020) toteavat, EU:n johtava rooli SER-romun keräyksessä ja jätehuollossa sekä standardoinnissa (myös elektronisten laitteiden materiaalitehokkuuden osalta) voi myös olla voimavara, jolla voidaan vähentää digitaalisten teknologioiden tarvitsemien raaka-aineiden saantiriskiä. Tämä digitaalinen jälleenteollistuminen vaatii, että teknologioille tärkeitä raaka-aineita on varmasti saatavilla (esimerkiksi harvinaiset maametallit, gallium, germanium ja platinaryhmän metallit) ja että prosessoitujen materiaalien mahdollisuuksia kehitetään. Vaikka Yhdysvallat onkin EU:n liittolainen, lähitulevaisuudessa EU:n valmistussektori tulee käymään entistä kovempaa kilpailua raaka-aineista Yhdysvaltain teollisuuden kanssa (vrt. White House 2021).

EU Science Hubin (2020) mukaan nämä Bobban ja muiden (2020) esimerkit osoittavat, että turvattu raaka-ainetarjonta niin primääri- kuin uusiolähteistä, jatkuva tutkimus sekä korvaaviin materiaaleihin ja vastuullisempaan tuotesuunnitteluun tähtäävä innovointipolitiikka ovat välttämätön toimenpide. Vain näin EU:n teollisuus pysyy kilpailukykyisenä ja joustavana, voi toipua koronakriisistä ja siirtyä kohti vihreää ja digitaalista teollisuutta.

2.2.1 EU:n mineraalipolitiikka

Teksti perustuu Kivisen ja Käpyahon (2019) artikkeliin. Euroopan komissio julkaisi vuonna 2008 raaka-ainealoitteen (RMI), jonka tarkoituksena on kiinnittää poliittista huomiota raaka-aineiden keskeytyksettömään saatavuuteen EU-alueella. Aloitteen tavoitteena oli vähentää eurooppalaisen teollisuuden voimakasta riippuvaisuutta tuoduista mineraaliraaka-aineista ja vähentää mahdollisten tuontikatkosten taloudellisia vaikutuksia. Mineraaliraaka-aineet ja niiden saatavuus ovat aloitteen keskiössä, ja RMI:n voi nähdä EU:ssa viime vuosikymmenen aikana mineraaleille annetun kasvavan poliittisen huomion alkupisteenä. Se on vaikuttanut kansallisten mineraalistrategioiden laatimiseen ja tutkimusrahoituksen kohdistamiseen sekä kansallisella että EU-tasolla. RMI:n julkaisun jälkeen Suomi oli ensimmäinen EU-maa, joka vuonna 2010 laati oman kansallisen mineraalistrategiansa.

Raw Materials Supply Group on asiantuntijaryhmä, joka neuvoo Euroopan komissiota raaka-aineisiin liittyvissä aiheissa ja valvoo RMI:n toteuttamista. RMI vaikutti myös Euroopan komission kriittisten raaka-aineiden luettelon laatimiseen. Lista on vaikuttanut poliittisten toimien ja tutkimusrahoituksen kohdistamiseen. Lista julkaistiin ensimmäistä kertaa 2011, ja sitä on päivitetty 2014, 2017 ja 2020 (Blengini ja muut 2020).

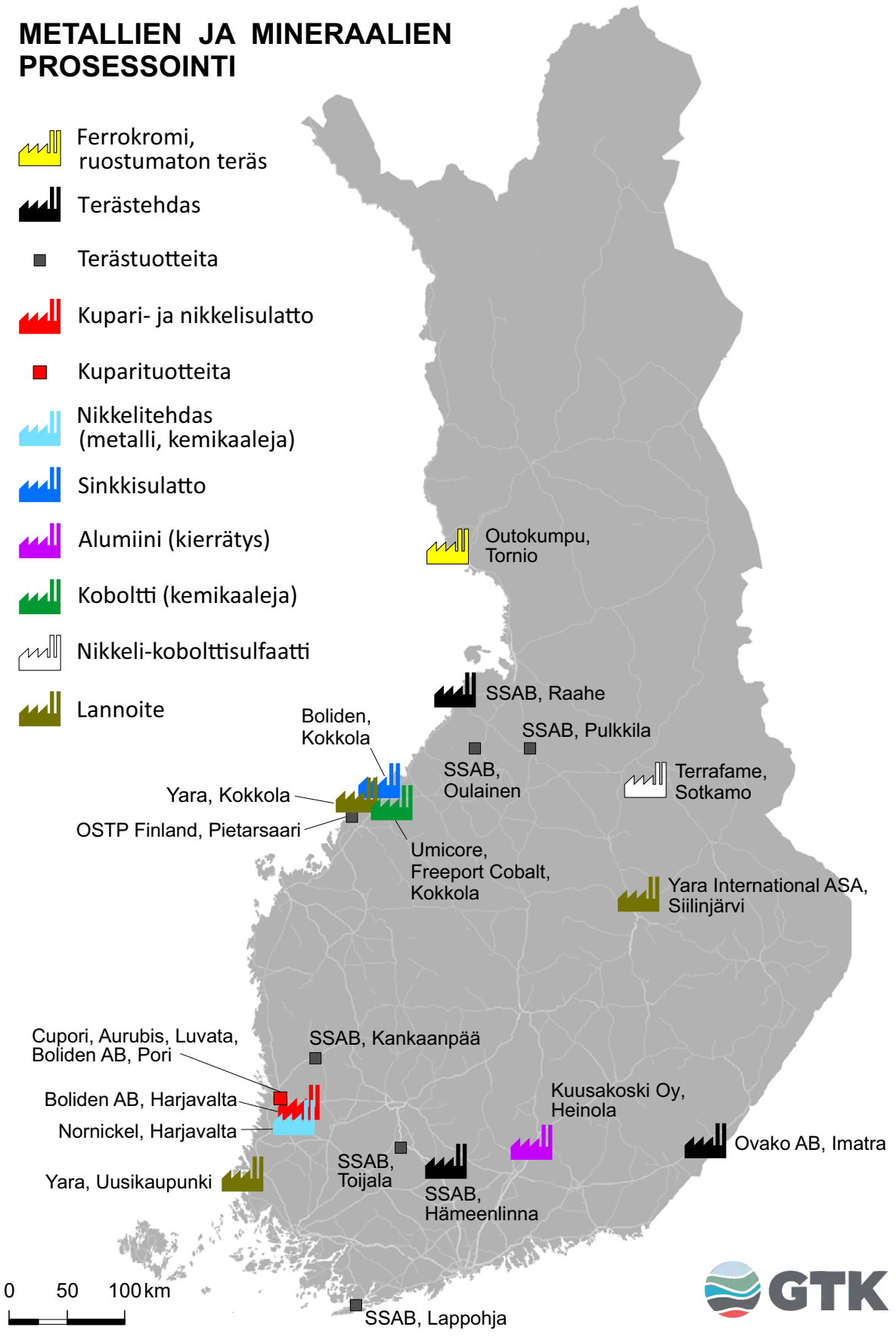
Vuonna 2012 Euroopan komissio käynnisti eurooppalaisen raaka-aineiden innovaatiokumppanuuden (European Innovation Partnership on Raw Materials eli EIP-RM). Innovatiivisen kumppanuuden tavoitteena oli vauhdittaa innovointia yhdistämällä yksityistä ja julkista tutkimusta, kehitystä ja innovointia kaikkialla Euroopassa. EIP-RM:n korkean tason ohjausryhmään, 24 Sherpa -ryhmään ja sen työryhmiin on vastikään nimitetty uusia jäseniä, joiden joukossa on yliopistojen, tutkimuslaitosten ja yritysten edustajia. Ryhmien tavoitteena on myös vaikuttaa tulevan yhdeksännen puiteohjelman sisältöön (EU:n Horizon 2020 -ohjelman jälkeen) siten, että raaka-aineisiin liittyvä tutkimus ja innovointi olisivat jatkossakin korkealla sijalla EU:n agendalla. Vaikuttaa siltä, että komissio tulee pitämään raaka-aineiden kiertotaloutta koskevaa tutkimusta ja innovointia prioriteettina myös tulevina vuosina. Tämä vuorostaan siirtää tutki-

muksen painopistettä uusioraaka-aineisiin, materiaalien kierrätettävyyteen ja uudelleenkäyttöön sekä parempaan tuotesuunnitteluun. Euroopan innovaatio- ja teknologiainstituutin raaka-aineinnovaatioihin keskittyvä yhteisö, EIT RawMaterials (EIT-RM), perustettiin vuonna 2015, ja myös se on vaikuttanut mineraalisektorin tutkimusrahoitukseen. EIT-RM-yhteisön tavoitteena on parantaa tutkimusdatan tehokasta käyttöä, jotta yhteiskunta voi hyödyntää tietoja uusissa tuotteissa ja liiketoiminnoissa ja kouluttaa uutta yrittäjähenkistä väkeä. EIT-RM on yksi EU:n keskeisistä instrumenteista mineraaleihin liittyvien innovaatiotoimintojen kehittämisessä. EIT-RM:n vuotuiset projektihakukierrokset ovat vauhdittaneet mineraalisektorin projektitoimintaa, ja samalla kasvattaneet mineraalisektorin koulutusten suosiota EU-alueella. Yritykset, tutkimuslaitokset ja yliopistot ovat EIT-RM:n kumppaneita. Lisäksi EU:n alueella toimii Eurooppalaisen teollisuuden raaka-aineverkosto (ERA-MIN), joka on suunnattu kaivossektorin rahoittajille ja kansallisille tutkimusohjelmille.

2.2.2 Suomi

Suomi on EU:n tärkeä metallintuottaja, ja Fraser Instituten vuosittaisissa kyselyissä Suomi on ollut maailman suosituimpien investointikohteiden joukossa jo useiden vuosien ajan (esim. Stedman ja muut 2020). Syy on siinä, että Suomessa on useita positiivisia tekijöitä: erityyppisille mineraaliesiintymille otollinen kallioperä; korkealaatuista ja helposti saatavilla olevaa geotieteellistä, mineraaliesiintymä- ja muuta olennaista dataa ja informaatiota; kattava, korkeatasoinen infrastruktuuri; luotettava lainsäädäntö; ja taloudellinen ja poliittinen vakaus. Suomessa on myös suuri kaivos- ja metallurgiateollisuuden klusteri, metallituotantolaitoksia, rikastamoja ja sulattoja (Kuva 9) sekä globaalisti tunnustettuja kaivos- ja prosessointiteknologian palveluntarjoajia.

Suomen primaarimetallintuotanto esitetään Taulukossa 9 ja tällä hetkellä aktiiviset kaivokset Kuvassa 10. Vuonna 2020 Suomessa oli tuotannossa yhdeksän metallikaivosta ja 27 teollisuusmineraalikaivosta. Tärkeimmät Suomessa tuotetut metallit ja mineraalit ovat teräs, kupari, nikkeli, sinkki, kromi, apatiitti ja talkki. Suomi on myös merkittävä koboltin tuottaja ja tuottaa myös alumiinia, kultaa, hopeaa ja platinaa. Suomessa on EU:n suurin kultakaivos (Kittilä) ja ainoat kromi- ja fosfaattikaivokset (Kemi ja Siilinjärvi, Kuva 10). Savukosken Soklista suunnitellaan toista fosfaattikaivosta, josta saataisiin myös niobiumia ja harvinaisia maametalleja (kuva 11). Jos Sodankylän Sakatin kaivos saa tarvittavat kaivosluvat, siitä voi tulla EU:n suurin nikkelikaivos Terrafamen Sotkamon (ent. Talvivaara) kaivoksen tilalle (Kuva 11). Suomi on myös Euroopan ainoa koboltintuottajamaa kahdella nikkelikaivoksellaan, joiden sivutuote koboltti on (Sotkamo ja Kevitsa, Horn ja muut 2020, Kuva 11). Käynnissä on myös muita kobolttikaivosprojekteja (Juomasuo, Rajapalot, Hautalampi), ja Keski-Pohjanmaalle suunnitellaan litiumkaivosta (Kuva 11). Lisäksi on meneillään malminetsintähankkeita, joissa etsitään vanadiinia, kobolttia, nikkeliä, grafiittia ja muita raaka-aineita. Hankkeilta odotetaan hyötyjä EU:n liikennesektorin sähköiseen siirtymään, sillä niistä saataisiin akkumineraaleja.



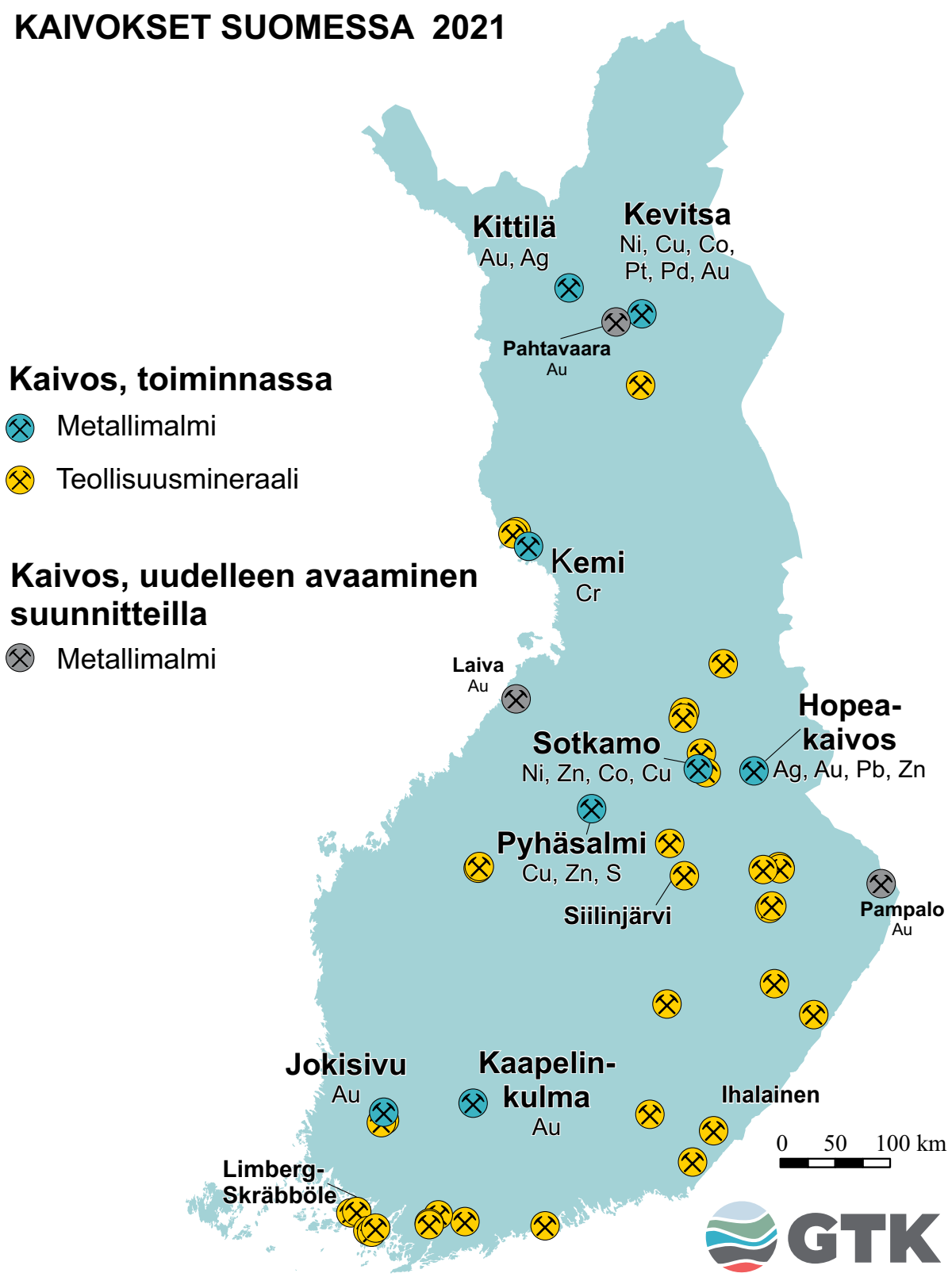
Kuva 9. Sulatot ja metallien ja mineraalien jalostuslaitokset Suomessa 2020 (© Geologinen tutkimuskeskus).

Taulukko 9. Suomen kaivosten metallintuotanto vuonna 2020.

Raaka-aine	Yksikkö	Määrä
Hopea (Ag)	(kg)	54 833
Koboltti (Co)	(t)	1 559
Kulta (Au)	(kg)	8 668
Kupari (Cu)	(t)	36 278
Lyijy (Pb)	(t)	1 530
Nikkeli (Ni)	(t)	41 429
Palladium (Pd)	(kg)	858
Platina (Pt)	(kg)	1 277
Sinkki (Zn)	(t)	61 213

Kuten Taulukko 8 ja Kuvat 10 ja 11 näyttävät, Suomessa tuotetaan useita digitalisaatiossa käytettyjä raaka-aineita (Ag, Au, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Pd, Pt, Zn) ja käynnissä on muihin digitalisaatioon liittyviin raaka-aineisiin (Li, Nb, REE ja V) liittyviä kaivoshankkeita. Digitalisaatioon liittyvien raaka-aineiden kaivostuotanto ja varannot Suomessa ovat mukana Taulukossa 5. Vaikka Suomi on tärkeä mineraaliraaka-aineiden tuottaja, suurin osa käytetyistä raaka-aineista tuodaan Suomeen. On kuitenkin osoittautunut mahdottomaksi selvittää, kuinka suuri osa Suomen metallintuotannosta käytetään ICT-valmistukseen Suomessa tai muualla, sillä lähtömaa-spesifistä metallien toimitusketjua ei pystytä seuraamaan tavaroiden valmistukseen asti.

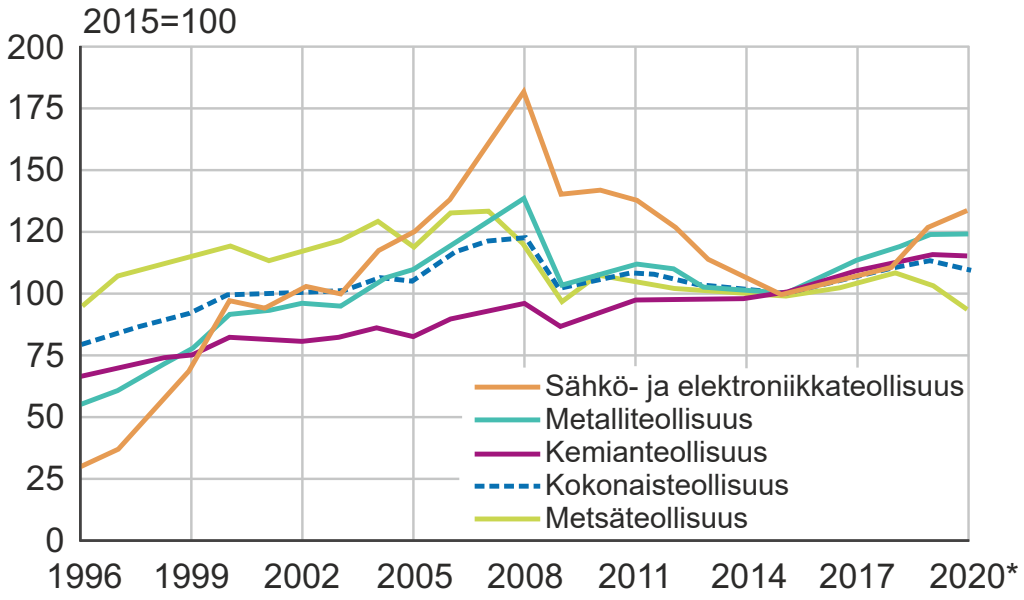
Saattaisi olla hyödyllistä verrata Suomen kaivostuotantoa ja metallivarantoja (Taulukko 5) EU:n arvioituun ICT-kysyntään (Taulukko 6). Vertailu osoittaa, että Suomi voisi tuottaa merkittävän osuuden EU:n digitalisaatioon tarvitsemista raaka-aineista. Tämä pätee varsinkin kromiin, kobolttiin, kultaan, nikkeliin, palladiumiin ja platinaan. Kun otetaan huomioon metallinjalostamoiden ja sulattojen tuotanto, Suomen potentiaali eurooppalaisen digitalisaation tarpeiden täyttäjänä on vielä tätäkin merkittävämpi koboltin, nikkelin, palladiumin ja platinan osalta. Lisäksi Suomessa on hyödyntämättömiä raaka-ainevarantoja, joista voisi saada useita sellaisia digitalisaatiolle tärkeitä raaka-aineita, joita tarvitaan vain pieniä määriä. Tällaisia ovat esimerkiksi antimoni, beryllium, grafiitti, hafnium, litium, mangaani, niobium, skandium, hyvin puhdas pii ja tantaali (Geologian tutkimuskeskus 2021). Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että Suomi voisi yksin täyttää koko EU:n ICT-alan raaka-ainetarpeet, sillä metallit on jaettava muiden teollisuuden sektoreiden kanssa. Näitä sektoreita ovat esimerkiksi sähköinen liikkuvuus ja uusiutuvat energiat, joiden raaka-ainekysynnän odotetaan kasvavan eksponentiaalisesti (Bobba ja muut 2020, IEA 2021, Michaux 2021). Tämä koskee varsinkin hopeaa, kultaa, kromia, kuparia, nikkeliä, lyijyä ja sinkkiä, joiden pääkysyntä tulee valmistus- ja rakennussektoreilta. Suomen teollisen tuotannon volyymi-indeksi eri sektoreilla esitetään Kuvassa 12. Lisätietoa Suomen kaivossektorista, ks. Vasara (2018).



Kuva 10. Metalli- ja teollisuusmineraalikaivokset ja niiden raaka-aineet Suomessa vuonna 2019 (© Geologinen tutkimuskeskus).

*Kaivosprojektilla tarkoitetaan tässä projektia, jota yhtiö edistää aktiivisesti kohti kaivostuotannon aloittamista ja joka on edennyt niin pitkälle, että, pääsääntöisesti, hankkeen YVA-ohjelma on toimitettu yhteysviranomaiselle.

Kuva 11. Kaivoshankkeet ja niiden raaka-aineet Suomessa vuonna 2019 (© Geologinen tutkimuskeskus).



Kuva 12. Valmistusteollisuuksien tuotannon volyymi-indeksi Suomessa (Tilastokeskus 2021).

2.3 Digitalisaation primaariraaka-aineiden tuotannon vastuullisuus

Vaikka digitalisaatio tarvitsee vain 0,5 % teollisuussektoreiden raaka-aineiden kokonaisvolyymistä, sillä on suuri vaikutus koko arvoketjuun. Primaariraaka-aineiden louhinnalla ja prosessoinnilla on yhteiskunnallisia ja ympäristövaikutuksia, varsinkin jos tuotannon hallinnoinnissa on puutteita. Ympäristövaikutuksia ovat luontokato, suorat ja epäsuorat kasvihuonekaasupäästöt (varsinkin prosessoinnista), pinta- ja pohjavesien saastuttaminen, maankäyttö, pöly, melu, jäte ja maisemamuutokset (varsinkin avolouhokset ja rikastusjätealtaat) (esim. Jain ja muut 2016). Näiden prosessien heikko hallinta voi johtaa vakaviin ympäristöriskeihin (esim. rikastusjätepatojen sortumiin), joilla voi olla vakavia ja kohtalokkaita vaikutuksia paikallisille yhteisöille ja kaivosten läheisille elinympäristöille. Viimeaikaisia esimerkkejä ovat onnettomuudet Marianan ja Brumandinhon kaivoksissa Brasiliassa, Minas Geraisin osavaltiossa (Koppe 2021).

Yritysten yhteiskuntavastuu

Asianmukaiset vastuullisuustoimet ja hallinnointi voivat lieventää näitä negatiivisia vaikutuksia ja riskejä. Kestävän kehityksen kolmea pilaria – sosiaalinen, ympäristöllinen ja taloudellinen (Elkington 1997) – voidaan käyttää yritysten toimien ohjaamiseen. Kestävän kehityksen pilarien integrointi itsesääteleväksi liiketoimintamalliksi tunnetaan myös yritysten yhteiskuntavastuuna.

Tätä tarkoitusta varten on olemassa suuri määrä erilaisia ohjeita ja vastuullisuuden raportointijärjestelmiä. Niiden kehittäminen alkoi 1990-luvun lopulla, kun kaivosteollisuus alkoi kohdata kasvavaa vastustusta paikallisilta yhteisöiltä, ympäristöjärjestöiltä ja alkuperäiskansoilta eri puolilla maailmaa (Thomson & Boutilier 2011). Yksi esimerkki tällaisesta lähestymistavasta on Kanadan Towards Sustainable Mining (TSM). Se asettaa asioiden sosiaaliselle, taloudelliselle ja ympäristöä koskevalle hoitamiselle sarjan periaatteita ja kriteereitä, jotka tähtäävät vastuulliseen kaivostoimintaan. Kaivostoiminnan vastuullisuutta ja yritysten yhteiskuntavastuuta on myös kritisoitu (Whitmore 2006, Hilson 2012, Slack 2012). Kaivostoiminta hyödyntää uusiutumattomia luonnonvaroja ja sillä on haitallisia vaikutuksia, joten sen kestävyyttä pidetään heikkona. Kestävyyttä voidaan siis parantaa tavoilla, jotka minimoivat näitä negatiivisia vaikutuksia. Metallien käyttövaihe voi parantaa arvoketjujen kestävyyttä, sillä useita metalleja, esimerkiksi terästä (Fe, Cr, Ni) ja kuparia, käytetään pitkiä aikoja, ja niiden käyttöikää voidaan pidentää myös kierrättämällä.

Kaivossektorin lisäksi myös muilla teollisuuden sektoreilla on huomionarvoista, että vastuulliseen toimintaan tarvitaan useita ohjeita ja erilaisia raportointijärjestelmiä. Tämä on leimallista aloille, joilla vastuullisuus ei ole ollut osa yritystoiminnan

ydintä. Toisin sanoen vastuullisuus ei näillä aloilla ole automaattista, vaan se on opittava, jotta alat voivat sopeutua maailmaan, jossa ympäristöarvot muuttuvat nopeasti. Itse asiassa kaivosteollisuus reagoi yleiseen kritiikkiin vasta varsin myöhään, 1990-luvun lopulla ja 2000-luvun alussa, kun vastustus kaivostoimintaa kohtaan lisääntyi kaikkialla maailmassa. Tämä reaktio nähtiin vain muutama vuosi ennen Kiinan talouskasvun aiheuttamaa äkillistä luonnonvarojen kysyntäpiikkiä, jota seurasi 2000-luvun globaali kaivosbuumi. Sen seurauksena maailman kaivoskonfliktien määrä moninkertaistui.

Kaivosteollisuuden hyväksynnän kohentamiseksi 1990- ja 2000-luvuilla kehitetyt vastuullisen ja yhteiskuntavastuullisen kaivostoiminnan työkalut on yrityksissä toivotettu tervetulleiksi ja otettu käyttöön vaihtelevissa määrin. Yhteiskunnalliset arvot ovat muuttuneet nopeasti, mikä on vaikuttanut myös siihen, miten kaivosteollisuuteen suhtaudutaan ja miten se hyväksytään. Siksi kaivosyritysten yhteiskuntavastuuta ja kaivosten hyväksyntää edistävien erilaisten menetelmien, työkalujen, raportointistandardien sekä parhaiden käytäntöjen luominen, kehittäminen ja vertailu on edelleen tärkeää. Keskustelu jatkuu todennäköisesti niin kauan kuin kaivosteollisuuteen liittyy ongelmia ja konflikteja.

Sosiaalisten vaikutusten hallinta

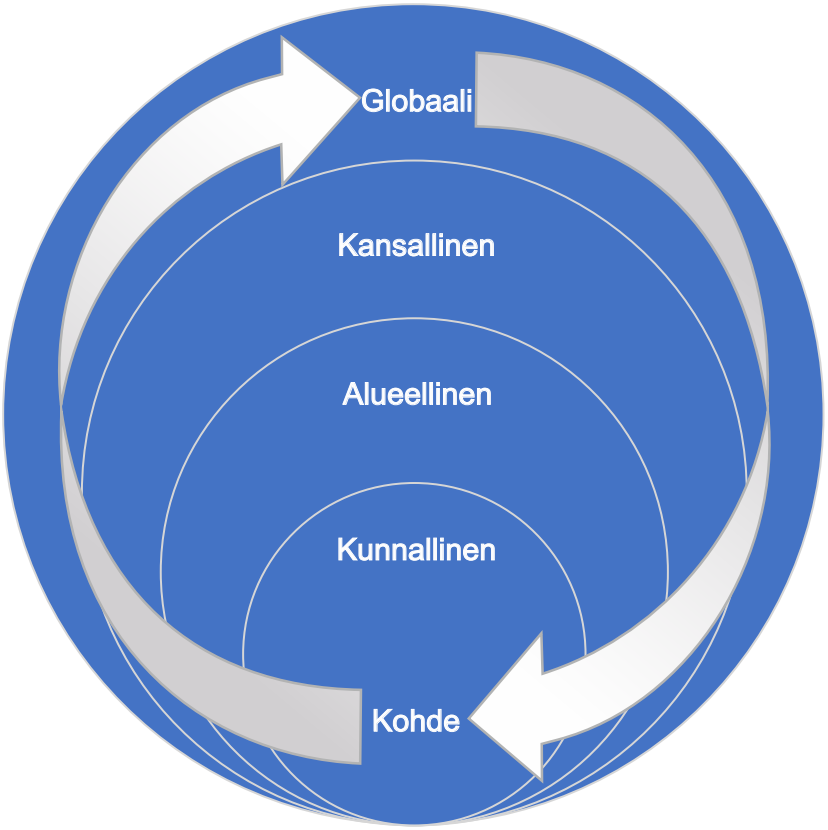
Sosiaaliset vaikutukset voivat olla positiivisia tai negatiivisia. Kun kaivostoimintaa hallitaan tehokkaasti, se voi luoda työpaikkoja, talouskasvua, infrastruktuuria ja hyötyä myös syrjäisille seuduille (reilu jakaminen, Zhang ja muut 2015). Se voi kuitenkin myös vahingoittaa esim. paikallisia luontoelinkeinoja, kuten maataloutta, karjataloutta ja turismia, joista paikalliset yhteisöt voivat olla riippuvaisia ja jotka ovat yhteisöille tärkeitä. Siksi vastuullinen kaivostoiminta ottaa olemassa olevat maankäyttötavat (esim. luonnonsuojelu) ja elinkeinot huomioon sekä paikallisia yhteisöjä että yrityksen omaa toimintaa koskevassa suunnittelussa ja riskinarvioinnissa. Tässä mielessä kaivosten perustaminen voi paikallisten yhteisöiden vuoksi olla haastavampaa tietyillä alueilla, joista joskus käytetään myös nimitystä ”no-go zone” (Goodland 2012). Vaikka malminetsintä ja kaivostoiminta on tehtävä alueilla, joilta on löydetty mineraaliesiintymiä tai joilla niitä todennäköisesti on, paikallisella kontekstilla on väliä (Mercer-Mapstone ja muut 2018). Muut haitalliset sosiaaliset vaikutukset voivat liittyä ihmisoikeusrikkomuksiin, aseistautuneiden ryhmien rahoittamiseen, korruptioon, sukupuolten välisen epätasa-arvon lisääntymiseen ja terveys- ja turvallisuusongelmiin, jotka ovat tavallisia kehittyvissä maissa (esim. Hilson 2012, European Commission 2020b).

Sosiaalinen toimilupa

Paikallisen yhteisön tai yhteiskunnan kaivostoiminnalle tai malminetsinnälle antama hyväksyntä eli sosiaalinen toimilupa on tärkeä maankäyttöön liittyvä kysymys (Thomson & Boutilier 2011). Siksi paikallinen konteksti on otettava huomioon toiminnan suunnittelussa ja päätöksenteossa (Mercer-Mapstone ja muut 2018). Tässä mielessä ympäristöasioiden hallinta ja innovaatiot, konsernin maine ja toiminta ovat tärkeitä myös paikallisille yhteisöille ja yhteiskunnalle (Provasnek ja muut 2017, Eerola 2021b).

Sen lisäksi, että ympäristövaikutukset tunnistetaan ja niihin puututaan etukäteen ja toiminnan aikana vastuullisen kaivostoiminnan ja malminetsinnän kannalta ratkaisevia tekijöitä ovat myös kohteen asianmukainen ja kunnioittava valinta, asenne, viestintä sekä sidosryhmien osallistaminen. Yrityksillä on siis oltava näihin liittyviä käytäntöjä, joita myös tehokkaasti sovelletaan käytäntöön. Ne osoittavat toiminnan reiluuden eli sen, että paikallisia kunnioitetaan ja kuullaan (Zhang ja muut 2015). Mahdolliset no-go-alueet kannattaa ottaa huomioon jo suunnittelussa. Näin vältytään kalliilta konflikteilta (Goodland 2012).

Yrityksen yhteiskuntavastuuseen ja sosiaaliseen toimilupaan liittyvät toimet (sidosryhmien osallistaminen, jaetut hyödyt) kannattaa ottaa mukaan heti malminetsinnän ja kaivostoiminnan alkuvaiheessa (esim. Thomson & Boutilier 2011, Eerola 2017). Jokainen väärinkäytös tai pahimmassa tapauksessa vakava kaivosonnettomuus, tapahtui sellainen missä tahansa, voi aiheuttaa vakavia seurauksia. Luonnolle ja ihmisille aiheutuvan vahingon lisäksi ne vaikuttavat paitsi yritykseen myös koko teollisuuteen mukaan lukien sellaiset yritykset, jotka jo toimivat niin sosiaalisesti kuin ekologisesti vastuullisesti. Digitalisaation mahdollistaman välittömän verkkoviestinnän ansiosta maailma on jatkuvassa globaalissa yhteydessä, ja siksi tällaiset tapahtumat voivat vaikuttaa kaivostoiminnasta käytävään keskusteluun paikallistasolta globaalille tasolle ja päinvastoin (Eerola 2017, Kuva 13).



Kuva 13. Digitalisaation mahdollistama kaivostoiminnasta käytävän keskustelun alueellisten tasojen välinen vuorovaikutus. Paikalliskohteen tasolla tapahtuva välikohtaus saattaa vaikuttaa välittömästi globaalilla, kansallisella ja paikallisella tasolla käytävään kaivoskeskusteluun ja päinvastoin (Eerola 2017).

Sosiaalinen toimilupa on kaivosteollisuudelle tärkeä prioriteetti (Ernst & Young Private Ltd. 2020), sillä sen puute voi rajoittaa malminetsintää ja kaivoshankkeita. Siksi legitimiteetin ja sosiaalisen toimiluvan puute voivat olla vakavia esteitä kaivosteollisuudelle, jota tarvitaan energiasiirtymään ja EU:n raaka-aineomavaraisuuden kasvattamiseen. Kaivosteollisuuden on siksi kehitettävä toimintaansa vastuullisempaan suuntaan ja parannettava julkisuuskuvaansa, jotta teollisuus voi muuttua elinkelpoisemmaksi. Tämä on tärkeää varsinkin, jos kaivostoiminnan laajentaminen on tarpeen energiasiirtymän materiaalivaatimusten täyttämiseksi.

Konfliktimineraalit ja niiden jäljitettävyys

Valitettavasti vastuulliseen kaivostoimintaan liittyy useita huonoja esimerkkejä ja vakavia globaaleja haasteita, varsinkin kehittyvissä maissa. Lasten, puoliorjien ja poliittisten vankien käyttö työvoimana, matalat tai olemattomat palkat, epäinhimilliset työolot ja vakavat ympäristöhaitat ovat ongelmia, joita primääriraaka-aineiden tuotantoon edelleen liittyy. Itse asiassa useat elektroniikassa käytetyistä raaka-aineista tulevat tällaisista olosuhteista. Raaka-aineet saattavat jopa liittyä aseellisten konfliktien rahoitukseen ja/tai aiheuttaa niitä, kuten on käynyt Afganistanissa ja Kongon demokraattisessa tasavallassa, jotka ovat surullisenkuuluisia konfliktimineraaleistaan.

Näitä niin kutsuttuja konfliktimineraaleja ovat timantit, tina, volframi, tantaali ja kulta. Ne ovat luonnonvaroja, joita louhitaan poliittisesti epävakailla alueilla, joilla sotilaalliset tai puolisotilaalliset ryhmät hyötyvät niiden louhinnasta ja rahoittavat toimintaansa louhinnasta saatavilla tuotoilla. Kongon demokraattinen tasavalta on useiden tärkeiden luonnonvarojen (esim. tantaali ja koboltti) tärkeimpiä tuottajia. Yli 60 % tantaalista käytetään elektroniikassa. Tantaalikondensaattoreita käytetään paljon viihde-elektroniikassa, joten ne ovat nyky-yhteiskunnalle hyvin tärkeitä. Kobolttia puolestaan käytetään kasvavissa määrin vihreän energian siirtymään liittyvässä akkuteollisuudessa, mutta sitä tarvitaan myös ICT-laitteiden akkuihin. Kriittiset raaka-aineet liittyvät saantiriskiin ja taloudelliseen merkitykseen, kun taas konfliktimineraalit liittyvät vastuullisuusnäkökohtiin.

Valitettavasti digitalisaation ja esimerkiksi sähköistymisen laajeneminen on suurilta osin riippuvaista kestämättömästi tuotetuista materiaaleista. Konfliktimineraalien käyttöä pyritään välttämään, ja siksi raaka-aineiden jäljitettävyyttä halutaan kehittää. Jäljitettävyys tarkoittaa sitä, että mineraalin alkuperä voidaan jäljittää sen tuotantokaivoksen (ja -maan) tasolle esimerkiksi mineraalin tunnetun geokemiallisen ja/tai isotooppikoostumuksen perusteella. Näin esimerkiksi Kongon demokraattisessa tasavallassa tuotettu koboltti tai tantaali voidaan tunnistaa ja sulatot ja teollisuus voivat välttää sen ostamista. Jäljitettävyyttä kehitetään parhaillaan useilla kansainvälisillä aloitteilla, esimerkiksi akkupassialoitteella (World Economic Forum 2021) ja raaka-ainesertifikaatilla (CERA 2021). Kannattaa kuitenkin huomioida, että useilla näiden raaka-aineiden louhinnasta taloudellisesti riippuvaisilla ihmisillä esimerkiksi Afganistanissa ja Kongon demokraattisessa tasavallassa saattaa olla hyvin vähän vaihtoehtoja hengissä pysyäkseen. Tuotannon päättyminen voi aiheuttaa vakavia sosiaalisia paikallistason vaikutuksia näissä jo valmiiksi köyhissä ja moniongelmaisissa maissa. Koska EU on suurilta osin riippuvainen Kongon demokraattisen tasavallan primaariraaka-ainetuotannosta, maan tuotantoa tulisikin tukea kehittymään hallituilla ja edistyksellisillä tavoilla ja pyrkiä lieventämään tuotannon haittavaikutuksia ja roolia erilaisissa konflikteissa.

Suurin osa kehittyvien maiden jatkuvista ongelmista liittyy syvään sosiaaliseen epätasa-arvoon ja osallisuuden puutteeseen. Köyhät maat, joissa on paljon luonnonvaroja, voivat olla hyvin riippuvaisia luonnonvaratuotannosta ja alttiita diktatuureille, köyhyydelle, korruptiolle, jatkuvalle poliittiselle ja taloudelliselle epävakaudelle sekä konflikteille. Tätä kutsutaan resurssikiroukseksi (esim. Natural Resource Governance Institute 2015). Vaikka suorat kansainväliset interventiot ovat haasteellisia, ne voivat myös ratkaista tilanteen. Ongelmista ei kuitenkaan ole helppoa ja nopeaa ulospääsyä. Ongelmien perustat ja syyt kulkevat syvällä historiassa ja markkinoissa. Kuluttajien on kuitenkin oltava tietoisia näistä ongelmista sekä ICT-laitteidensa raaka-aineiden alkuperästä. Heillä on markkinoilla merkittävä rooli. Siksi kuluttajien ja julkisen tietoisuuden lisääminen on ensimmäinen askel. Tätä varten on jo olemassa kansainvälisiä kampanjoita. Kuluttajilla on markkinoilla merkittävä rooli ja nämä voivat saada aikaan mullistavan muutoksen näiden tehokkuudessa ja vastuullisuusvaatimuksissa.

Raaka-aineiden riittävyys ICT-sektorille – tulevaisuudennäkymiä

Useat tuoreet raportit ja arviot ennakoivat kasvavaa kilpailua mineraaliraaka-aineista, kun samoja raaka-aineita tarvitaan sekä nykykäyttöihin että globaalin vähähiiliseen yhteiskuntaan siirtymisen sovelluksiin (esim. Hund ja muut 2020, IEA 2021, White House 2021). Tämä on herättänyt keskustelua ja huolia kaikilla talouden ja teollisuuden sektoreilla sekä luonnonsuojelun parissa. Kuka (mitkä valmistajat ja missä maissa) saa tarvitsemansa raaka-aineet? Paljonko lisää louhintaa todella tarvitaan? Voidaanko niin paljon uusia kaivoksia ylipäätään avata? Paljonko raaka-aineiden hinnat tulevat nousemaan? Miten kaivos- ja valmistusteollisuuden muutokset vaikuttavat talouksiin yleisesti, talouden eri sektoreihin tai maiden ja alueiden yhteiskuntiin ja luontoon? (Bobba ja muut 2020, Herrington 2021, IEA 2021, Michaux 2021)

Raaka-aineiden saatavuuden vaikutukset ICT-sektorille (tiukasti rajattuna) vaikuttavat pääasiassa maltillisilta. Tämä johtuu siitä, että ICT-laitteiden valmistukseen arvioidaan tarvittavan vain noin 0,5 % (painon mukaan) kaikista tuotetuista mineraaliraaka-aineista (Malmodin ja muut 2018, UNCTAD 2020). Varsinkin perusmetallien, rautametallien ja monien jalometallien (alumiini, kromi, koboltti, kupari, kulta, rauta, lyijy, magnesium, mangaani, molybdeeni, nikkeli, niobium, palladium, platina, hopea, titaani, volframi, vanadiini, sinkki) kysyntä on todennäköisesti pientä tai olematonta verrattuna infrastruktuurin, asuntorakentamisen, rahoituksen ja ajoneuvojen valmistuksen tarpeisiin (Taulukot 3 ja 5 ja niiden lähteet). Huomaa kuitenkin, että ICT-sektoriin ei ole laskettu mukaan sähköntuotantoa tai -varastointia (kuten akkujen valmistus). Pelkän ICT-sektorin kysyntä ei todennäköisesti vaadi uusien edellä mainittuja metalleja tuottavien kaivosten avaamista.

Jos merkittävien metallien tai jalometallien (kulta, palladium, platina ja hopea) tuotanto kasvaa, ICT-sektorilla voi olla saatavilla enemmän kriittisiä raaka-aineita. Tämä on seurausta siitä, että suuri osa ICT-sektorilla tarvittavista kriittisistä ja ei vielä kriittisiksi lasketuista raaka-aineista on pääosin tai kokonaan muiden metallien louhinnan sivutuotteita. Näitä sivutuotemetalleja ovat ainakin antimoni, arseeni, vismutti, gallium, germanium, hafnium, indium, iridium, rutenium, skandium, seleeni, telluuri ja tallium (Nassar ja muut 2016, Frenzel ja muut 2017, Mudd ja muut 2017, Eynard ja muut 2020, Latunussa ja muut 2020).

Esiin nousee kuitenkin kaksi ongelmaa: 1) Näiden sivutuotteiden talteenotto kaivoksista on tällä hetkellä varsin matalalla tasolla (lukuun ottamatta hyvin harvinaisia jalometalleja iridiumia ja ruteniumia), sillä talteenoton tuotot kaivos-, jalostus- ja sulattoyrityksille ovat usein hyvin pieniä tai olemattomia. Hallitusten kannustimia tullaan todennäköisesti tarvitsemaan, ellei sitten sivutuoteraaka-aineen kysyntä kasva tai saataville tule uutta, edullisempaa teknologiaa, jonka avulla raaka-aineen talteenotosta tulisi kannattavaa ja siten houkuttelevaa (Lusty & Gunn 2016); 2) Jos raaka-aineiden kysyntä muilla kuin ICT-sektoreilla on hyvin suurta, se voi vaikuttaa merkittävästi raaka-aineiden saatavuuteen ICT-valmistuksessa. Tämä myös nostaa raaka-aineen hintaa ja siten ICT-laitteen tai laitteen osan hintaa, jolloin valmistus ei enää välttämättä ole kannattavaa. Jälkimmäinen ongelma tulee todennäköisimmin vastaan tilanteessa, jossa globaalisti merkittävä kriittisen raaka-aineen tuottajamaa päättää ohjata raaka-aineen koko tuotannon oman teollisuutensa käyttöön ja siten rajoittaa raaka-aineen vientiä. Tällaista on tapahtunut muutamaan otteeseen, viimeisimpänä harvinaisille maametalleille Kiinassa.

Suurena, osittaisena poikkeuksena sivutuotekontekstiin ovat harvinaiset maametallit, beryllium ja tantaali. Suurin osa harvinaisista maametalleista saadaan fosfaatin ja raudan sivutuotteina, ja osa berylliumista ja tantaalista on litiumin, niobiumin ja tinan sivutuotteita (Zhou ja muut 2017, Latunussa ja muut 2020, USGS 2021). Kysynnän ennustettu suuri kasvu tarkoittaa sitä, että kaivoksia, joissa louhitaan näitä metalleja (ennen kaikkea harvinaisia maametalleja) päätuotteena, tarvitaan paljon nykyistä enemmän (Bobba ja muut 2020, IEA 2021). Suurin osa harvinaisista maametalleista kulutetaan energiasektorilla, jossa kysyntä kasvaa jatkuvasti ja voimakkaasti useiden, mutta ei kaikkien maametallien osalta. Harvinaisten maametallien hinnat tulevat luonnollisesti kasvamaan myös ICT-sektorilla, sillä kaikki harvinaiset maametallit tulevat aina samoista esiintymistä. Berylliumissa saman ilmiön voi aiheuttaa tiettyjen metalliseosten kysynnän kasvu. Tantaalin kysyntä muilla kuin ICT-sektorilla on pientä eikä siten aiheuta merkittävää kilpailu-uhkaa ICT-sektorille.

Kun huomioidaan matalahiiliseen yhteiskuntaan siirtymiseen liittyvät ennusteet valtavasta raaka-aineiden kysynnän kasvusta, oletamme, että energiasektorin kysyntä vaikuttaa eniten seuraavien, ICT-laitteiden valmistuksessa tarvittavien raaka-aineiden kysyntään: platina, palladium, harvinaiset maametallit ja skandium. Harvinaisten maametallien kysyntä kasvaa eniten autojen sähkömoottoreissa ja tuuliturbiineissa tarvittavissa magneeteissa, platinan ja palladiumin kysyntä polttokenno- ja vetyteknologiassa ja skandiumin kysyntä korkealujuusseoksissa ja polttokennoissa (esim. Latunussa ja muut 2020).

Metallien louhinta, jalostaminen ja sulattaminen sekä digitaalisen teknologian komponenttien valmistaminen voivat vaikuttaa negatiivisesti ilmastoon (hiilidioksidi), ympäristöön ja paikallis-, alue- ja maatason sosiaaliseen ja taloudelliseen vastuullisuuteen. Tämä pätee varsinkin kehittyviin maihin, joissa energiantuotanto perustuu yleensä kivihiileen, siihen liittyvä sääntely ja lainsäädäntö on heikkoa ja korruptio läpikotaista. Raaka-aineiden ja komponenttien kysynnän ennustetaan kasvavan matalahiiliseen yhteiskuntaan siirtymisen myötä. Kierrätys voi kattaa vain murto-osan kysynnästä, joten louhinnan ja mineraalien jalostuksen lisääntymistä ei voida välttää. Siksi onkin tärkeää, että metalleja ja komponentteja tuotetaan maissa, joiden yhteiskunnallinen ja ympäristölainsäädäntö on tiukkaa, hiilidioksidipäästöt mahdollisimman pieniä ja tarjonta jatkuvaa ja joustavaa. Tämä tarkoittaa, että kaivoksia, mineraalien jalostusta ja komponenttien tuotantoa on saatava nykyistä enemmän myös Eurooppaan, Pohjoismaihin ja Suomeen. Euroopassa geologia suosii pohjoisia alueita. ICT-laitteiden valmistuksessa tarvittavista metalleista kromia, kobolttia, kuparia, litiumia, grafiittia, hafniumia, nikkeliä, niobiumia, platinaryhmän metalleja, harvinaisia maametalleja, skandiumia, tantaalia, titaania ja vanadiinia löytyy Suomesta, ja niiden varannot ovat huomattavia. Vastaavaa, isäntämaille ja koko Euroopalle merkittävää mineraalipotentiaalia on myös Grönlannissa, Norjassa ja Ruotsissa (Kolb ja muut 2016, Eilu ja muut 2020, 2021). Pohjoismaissa on myös tarjolla runsaasti vähähiilistä energiaa, ja vähähiilistä metallien jalostusta kehitetään laajalti. Tämä lisää alueen mineraaliteollisuuden ympäristöhyötyjä.

3 TAPAUSESIMERKKEJÄ – ÄLYPUHELIN JA ÄLYTELEVISIO

Elektroniikan käyttö on hyvin monipuolista. Elektronisia laitteita on lukuisiin eri käyttötarkoituksiin, ja uusia malleja ja sovelluksia kehitetään jatkuvasti. Osa on kuluttajien arjessa toisia enemmän mukana. Älypuhelimet ja kannettavat tietokoneet ovat hyviä esimerkkejä laajalle levinneestä massakulutuksesta. Niiden primääriraaka-ainekoostumusta onkin tutkittu kattavasti. Siksi valitsimme tarkemman tutkimuksen kohteeksi juuri älypuhelimen. Toiseksi esimerkiksi valittiin älytelevisio, joka on tuotteena varsin uusi, mutta sen markkinat ovat kasvaneet nopeasti. Älytelevisiosta on tullut normaali laite suuressa osassa kotitalouksia.

Älypuhelimet ovat erottamaton osa nykyelämää. Yli 90 % EU-valtioiden aikuisista omistaa älypuhelimen, ja osa omistaa ja käyttää jopa useampaa laitetta (Rizos ja muut 2019). Älypuhelinten tuotannon, käytön ja hävittämisen sosiaalinen ja ympäristökuorma on kuitenkin merkittävä. Tämä kattaa esim. suorat ja epäsuorat päästöt raaka-aineiden louhinnasta ja prosessoinnista, välituotteiden, komponenttien ja älypuhelinten tuotannosta ja niiden käytöstä ja kierrätyksestä. Lisäksi huonot työolot, ja niihin liittyvät negatiiviset terveysvaikutukset ovat myös tärkeitä kestävyysvaikutuksia (Rizos ja muut 2019).

Älypuhelinten valmistuksen suurimmat ympäristövaikutukset tulevat raaka-aineiden louhinnasta, komponenttien valmistuksesta ja lopputuotteiden kokoamisesta (Rizos ja muut 2019, Gurita ja muut 2018). Myynnin kasvu ja verrattain lyhyet elinkaaret pitävät älypuhelinten myynnin korkealla tasolla, vaikka älypuhelinten globaali huippumyynti on jo ehkä saavutettu (Mongardini & Radzikowski 2020).

Älytelevisiot korvaavat perinteisiä televisioita nopeasti, sillä jo vuonna 2018 toimitetuista televisioista 70 % oli älytelevisioita. Älytelevisioiden globaali myynti oli vuonna 2019 lähes 210 miljoonaa yksikköä, ja vuosittaisen myynnin määrän odotetaan kasvavan 250 miljoonaan yksikköön seuraavan viiden vuoden aikana. (Statista 2021a) Myös älytelevisioiden koko ja samalla energiankulutus kasvaa.

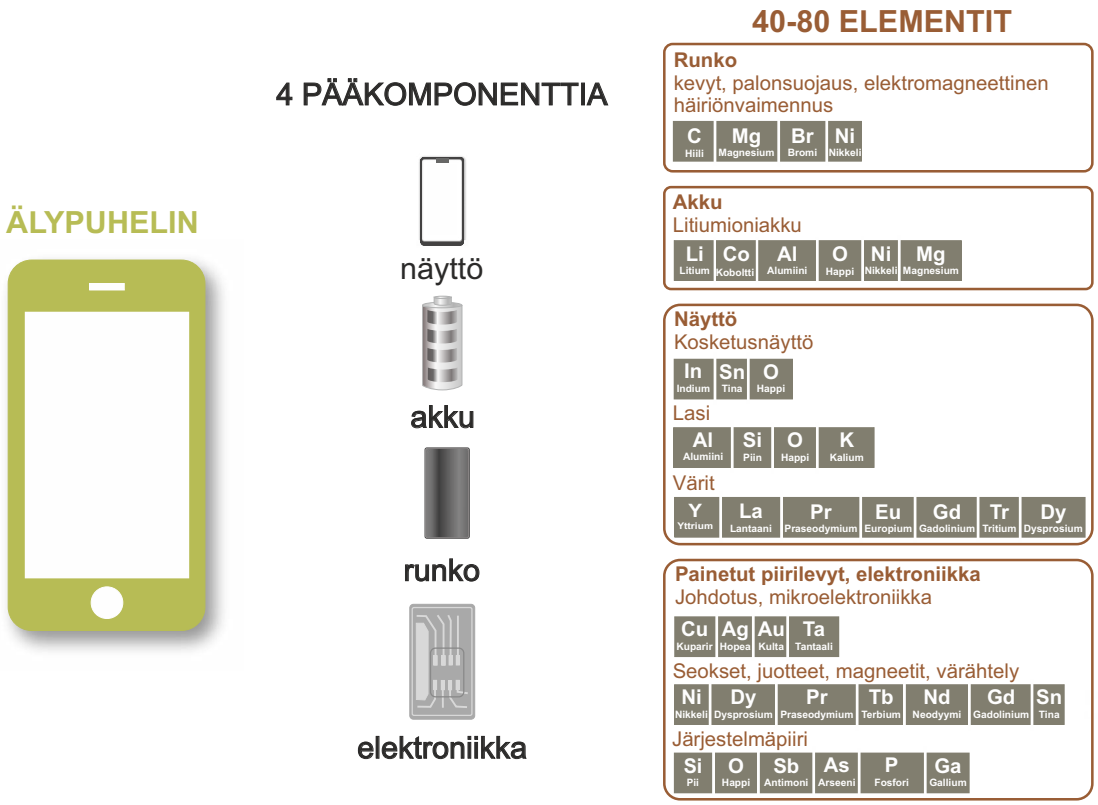
Suurempien näyttöjen ja siksi merkittävästi suuremman energiankäytön vuoksi älytelevisioiden ympäristövaikutus keskittyy enemmän käyttövaiheeseen (Berwald ja muut 2020). Älytelevisiot sisältävät kuitenkin kriittisiä raaka-aineita, ja niiden käyttöiän pidentämisellä on todettu olevan positiivisia ympäristövaikutuksia (Berwald ja muut 2020, Prakash ja muut 2016).

Ercan ja muut (2016) arvioivat, että älypuhelimen kokonaishiilijalanjälki tukijärjestelmineen on 62 kg CO2e. Merkittävä osa tästä johtuu älypuhelimen tukijärjestelmistä, eli datakeskuksista, liityntäverkoista ja IP-runkoverkoista (43 kg CO2ekv). Tämä on yli kaksi kertaa enemmän kuin älypuhelimen valmistuksesta aiheutuva hiilijalanjälki (19 kg CO2e). Analyysi perustuu vuoden 2010 tietoihin, ja sen jälkeen dataliikenne on kasvanut huomattavasti. Siksi onkin perusteltua olettaa, että tukijärjestelmien energiankäyttö on kasvanut merkittävästi ja samalla myös laitekohtainen hiilijalanjälki on kasvanut. Lisääntyvä tietoliikenne asettaa vaatimuksia olemassa olevan ja uuden ICT-infrastruktuurin investoinneille, jotka puolestaan lisäävät myös raaka-aineiden kulutusta. Tämän raportin tapausesimerkit keskittyvät loppukäyttäjälaitteisiin, ja sen takia tukijärjestelmät on jätetty tutkimuksen ulkopuolelle.

3.1 Pääkomponentit

3.1.1 Älypuhelin

Älypuhelin voidaan jakaa neljään pääkomponenttiin: elektroniikka, näyttö, akku ja runko (Kuva 14). Älypuhelinten keskeisiä elektronisia komponentteja ovat painettu piirilevy (PCB), magneetit, johdot, mikrofoni, juotteet ja sirut. Elektroniset komponentit liitetään toisiinsa juotteella. Itse laitteen lisäksi älypuhelimen käyttöön tarvitaan useita tukielementtejä. Näitä ovat esimerkiksi laturi, data- ja puheliittymät ja muut vapaavalintaiset lisävarusteet. Nämä joko suojaavat ja personoivat laitetta (esim. kuoret) tai laajentavat sen käyttöä (esim. kuulokkeet). Älypuhelimen käyttöön tarvitaan myös muita olennaisia komponentteja, jotka voivat ensisilmäyksellä vaikuttaa merkityksettömiltä. Jo mainittu mobiililiittymä on kuluttajan väylä verkkopalveluntarjoajan televiestintäverkkoon, mutta sen lisäksi puhelin käyttää sovelluksia, erilaisia pilvi- ja suoratoistopalveluita ja muita verkkopalveluita, jotka vaativat fyysistä infrastruktuuria eli datakeskuksia ja runkoverkkoja. Tämä tuotejärjestelmän osa on suurelta osin piilossa kuluttajilta ja jää usein yksittäisen laitteen vaikutusarvioissa



Kuva 14. Älypuhelin ja sen pääkomponentit ja -elementit.

järjestelmärajojen ulkopuolelle. Niinpä tavallisen kuluttajan on mahdotonta hahmottaa älypuhelimen käytön koko materiaali- ja energiaintensiteettiä.

Termi matkapuhelin kattaa vanhat matkapuhelimet (näppäimistö kosketusnäytön sijasta) ja älypuhelimet (uuden sukupolven matkapuhelimet, joissa on kosketusnäyttö, sovellukset mahdollistava käyttöjärjestelmä sekä internetyhteys). Älypuhelimet ovat hallinneet puhelinmyyntiä globaalisti vuodesta 2014 asti (Bookhagen ja muut 2020). Suomessa älypuhelinten myynti on ollut huomattavasti muiden puhelinten myyntiä suurempaa tätäkin pidempään. Siksi tässä tutkimuksessa keskitytään älypuhelimiin, joita on ylivoimaisesti suurin osa viime vuosina myydyistä matkapuhelimista.

3.1.2 Älytelevisio

Älytelevisio (tai hybriditelevisio) tarkoittaa televisiota, jossa on integroitu internet ja vuorovaikutteisia ominaisuuksia, joiden avulla käyttäjät voivat esim. käyttää internetiä, katsella kuvia, suoratoistaa musiikkia ja videoita sekä käyttää suoratoistotelevisiota ja internetradiota. Teknologian näkökulmasta ne ovat tietokoneen, television ja digitaalisen median soittimien yhdistelmiä. Älytelevisiota voi myös käyttää ulkoisilla laitteilla kuten älypuhelimilla, pelikonsoleilla ja muilla verkkoon liitetyillä laitteilla. (Wikipedia 2021)

Älytelevision pääkomponentteja ovat näyttöpaneeli, jalusta, virtalähde sekä logiikka- tai emolevyt, PCB:t (piirilevyt) mukaan lukien. Samsung (2011) esittää, mistä LED-teknologialle perustuva älytelevisio muodostuu. Näyttö on yksi älytelevisioiden keskeisistä komponenteista, ja näyttöteknologioita on useita. Niitä ovat esimerkiksi perinteiset katodisädeputket (CRT), plasmanäyttöpaneelit (PDP), nestekristallinäytöt (LCD), loistediodit (LED) sekä niiden variantit, orgaaniset loistediodit (OLED) ja Quantum Dot LED -TV:t (QLED). Tässä raportissa keskitytään kaikkien näyttöteknologioiden materiaalitarpeisiin, ja erityisesti painotetaan nousevia näyttöteknologioita, esim. QLED:ien toimitusketjuja. Näyttö voidaan jakaa esim. seuraaviin osiin: kehys, kidepaneeli, optinen levy, LPG eli valojohdinlevy, LED, pohja-alusta ja kuoret.

Emolevy ja muu elektroniikka pitävät sisällään esim. puolijohdekomponentteja, prosessoreja, grafiikkaprosessoreja, johtoja ja virittimiä. Muita komponentteja ovat liitännät ja moduulit, mukaan lukien HDMI, USB, WiFi ja Bluetooth, videokamera, kosketuspainikkeet, kaiuttimet ja erilaiset anturiratkaisut, esim. valoanturit kirkkauden säätöä varten. Ulkoisia komponentteja ovat esim. seinä-

kiinnikkeet tai jalustat, kaukosäätimet ja muut lisälaitteet. Kriittisten ja arvokkaiden raaka-aineiden näkökulmasta erityisen kiinnostavia ovat näyttö, joidenkin LCD-näyttöjen taustavalot sekä elektroniikka (esim. kootut PCB:t, virtalähde ja johdot) (Buchert ja muut 2012).

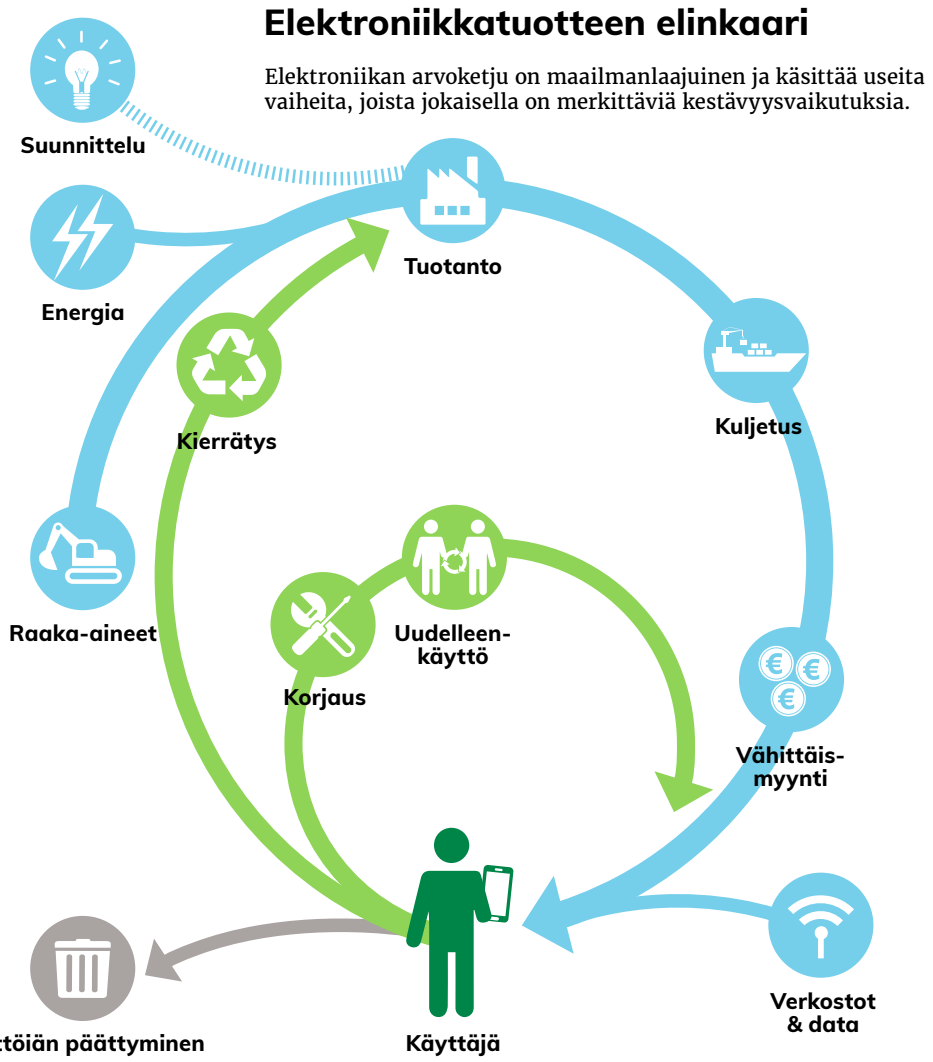
3.2 Arvoketju ja keskeiset toimijat

3.2.1 Älypuhelin

Älypuhelimet kuuluvat viihde-elektroniikan markkinasegmenttiin, johon kuuluvat myös esimerkiksi televisiot, tabletit, kuulokkeet ja audiolaitteet. Vuonna 2017 EU:n viihde-elektroniikkasektori vastasi 1,32 %:a kotitalouksien kulutuksesta, ja viihde-elektroniikan valmistuksen liikevaihto oli 60 miljardia euroa (Rizos ja muut 2019). Älypuhelinten globaalit markkinat olivat 1,37 miljardia laitetta vuonna 2019 (Mongardini & Radzikowski 2020). Vuoden 2019 puolivälissä maailman väestöä arvioitiin olevan 7,7 miljardia, joten jopa 18 % maailman väestöstä hankki uuden älypuhelimen vuonna 2019.

Tällä hetkellä älypuhelimen arvoketju on pääasiassa lineaarinen (Rizos ja muut 2019). Se voi sisältää seuraavat vaiheet (Kuva 15):

1. raaka-aineiden louhinta
2. komponenttien valmistus
3. älypuhelimen kokoonpano
4. kuljetus ja myynti
5. käyttö
6. uudelleenkäyttö, uudelleenvalmistus ja päivitys (tuotteen käyttöiän pidentäminen)
7. kierrätys
8. hävitys, vienti tai horros



Kuva 15. Älypuhelimen elinkaari.

Älypuhelinkomponentit valmistetaan ja laitteet kootaan pääasiassa Aasiassa, varsinkin Kiinassa, Etelä-Koreassa, Malesiassa, Intiassa, Singaporessa, Vietnamissa ja Taiwanissa (Rizos ja muut 2019). Etelä-Korea on älypuhelinkomponenttien ja puolijohdetuotteiden päätoimittaja, ja ne muodostivat 17 % maan viennistä vuonna 2017. Älypuhelimet muodostivat 5,7 % Kiinan viennistä vuonna 2017. Älypuhelinten toimitusketjut ovat monimutkaisia, ja tuotemerkkien omistajat ovat yleensä ulkoistaneet komponenttien valmistamisen ja puhelinten kokoonpanon. Esimerkiksi iPhonessa on komponentteja yli 200 toimittajalta eri puolilta maailmaa (Ethical consumer 2019). Älypuhelinkomponenttien päävalmistajat jakautuvat esimerkiksi seuraavasti: siruja, virtalähteitä ja RF-laitteita valmistaa Qualcomm (Yhdysvallat), puolijohdetuotteita ja tallennustilaa valmistaa Toshiba (Japani), mikropiirejä ja useita muita komponentteja valmistavat Foxconn ja TSMC (Taiwan), tallennustilatuotteita valmistaa Micron Technology (Yhdysvallat), mikroprosessoreja valmistaa Renesas (Japani) ja kosketusnäyttöjä valmistavat Sharp (Japani) ja Wintek (Taiwan). Älypuhelinakkujen markkinajohtajia ovat TDK ATL (Japani), LG ja Samsung (molemmat Etelä-Koreasta). Älypuhelinten suojakuoria valmistavat useat yritykset, esimerkiksi OtterBox (Yhdysvallat). Kun komponentit on hankittu valmistajilta, ne viedään tehtaaseen koottaviksi. Suunnittelupalveluyritykset (Original Design Manufacturers eli ODM) ovat älypuhelinvalmistuksen merkittäviä tekijöitä, jotka suunnittelevat, valmistavat ja kokoavat älypuhelimia tuotemerkin omistajien tarpeiden mukaan. Suurimpia ODM:iä ovat Wingtech, Huaqin, Loncheer (kaikki Kiinasta) ja Pegatron, Wistron ja Compal (kaikki Taiwanista) (OMDIA 2020). Kiinan suurin älypuhelimia kokoava (ja suunnitteleva) yritys on Foxconn, ja iPhonet valmistetaan sen Zhengzhoun tehtaissa (Ethical consumer 2019).

Euroopassa tietokoneiden ja elektroniikkatuotteiden valmistusmäärät pienenevät ja televiestintälaitteiden valmistus on vähentynyt dramaattisesti: vuonna 2007 valmistettiin 207 miljoonaa yksikköä ja vuonna 2017 enää 2,8 miljoonaa yksikköä (Rizos ja muut 2019). Vaikka on myös eurooppalaisia älypuhelintuotemerkkejä, joiden tuotteet kootaan Euroopassa, älypuhelinkomponentit valmistetaan silti Aasiassa (ibid.). Eurooppalaisia älypuhelinvalmistajia ovat mm. Bosch, NXP ja STMicroelectronics.

Euroopassa matkapuhelinten kokonaismyynti on viime vuosina laskenut. Vuonna 2007 puhelimia myytiin 307 miljoonaa, kun taas 2017 enää 182 miljoonaa yksikköä. Toisin kuin valmistus, myyntivaihe tapahtuu yleensä Euroopassa. Älypuhelimesta ostettaessa maksettavaan hintaan saa usein alennuksen, kun tekee oston yhteydessä sopimuksen palveluntarjoajan kanssa. Yhdysvalloissa leasingohjelmat ja puhelimen vaihto uuteen osana sopimusta ovat yleisempiä kuin Euroopassa. (Rizos ja muut 2019)

Käyttövaiheessa älypuhelinta käyttää yleensä vain yksi kuluttaja, minkä jälkeen se heitetään pois. Laitteiden käyttöikää voi kuitenkin pidentää uudelleenkäytöllä, kunnostuksella tai uudelleenvalmistuksella. Useat verkkoalustat tarjoavat markkinapaikan älypuhelinten uudelleenkäyttöön. Älypuhelinten kunnostusta tarjoavat sekä valmistajat ja tuotemerkin omistajat, että muut yritykset, kuten Recommerce Group (Ranska) ja Swappie (Suomi). Uudelleenvalmistusta tehdään globaalilla tasolla, mutta Euroopassa sitä ei vielä suuressa mittakaavassa tehdä (Gurita ja muut 2018). Suuri osa älypuhelimista kuitenkin horrostaa kotitalouksissa, ja osa niistä jopa hävitetään sekajätteen joukossa. Pieni mutta kasvava osuus älypuhelimista kerätään ja niiden arvokas raaka-ainesisältö otetaan talteen ja kierrätetään. Kierrätysvaiheessa talteen otettujen materiaalien osuus on suhteellisen pieni (14–22 %, Reuter ja muut 2018). Tämä johtuu osassa 3.6 käsiteltävästä tuotteen ja materiaalin monimutkaisuudesta. Suuria eurooppalaisia älypuhelinten ja muiden ICT-laitteiden kierrättäjiä ovat Umicore (Belgia), Boliden ja Stena Recycling (Ruotsi) ja Kuusakoski (Suomi). Älypuhelimia saatetaan myös viedä EU:n ulkopuolelle. Taulukko 10 esittää älypuhelinten arvoketjun tärkeimmät toimijat.

Taulukko 10. Älypuhelinten arvoketjun tärkeimmät toimijat.

Arvoketjun osa	Eurooppa	Muu maailma
Raaka-aineiden louhinta	Barium: Sachtleben Bergbau, M-I SWACO Kromi: Outokumpu Kupari, sinkki, hopea: KGHM Polska Miedz, Boliden, Terrafame, Lundin Mining Kulta: AgnicoEagle, Boliden Rauta: LKAB Magnesium: Grecian Magnesite, Magnesitas De Rubián, Magnesitas Navarras, Nedmag, SLOVMAG, SMZ Nikkeli, koboltti, palladium: Terrafame, Boliden Piimetalli: Elkem Piihiekka: Sibelco, Hoffmann Mineral, Brogardsand, Elkem, CAOBAR Strontium: Canteras Industriales, Solvay Titaani: Kronos	• Yritykset: Rio Tinto, BHP, Vale, AngloAmerican, Barrick, Freeport-McMoran, Jinchuan, Impala Platinum, SibayneStillwater, FQM, Vedanta, Zijin Mining • Tärkeimmät muut kuin eurooppalaiset tuottajat löytyvät Taulukosta 2.
Komponenttien valmistus	• Useilla komponenttien valmistajilla on valmistuslaitoksia Euroopassa, esim. Foxconn • Elektroniikka: Bosch, STMicroelectronics, NXP	• Pääasiassa Aasiassa: Kiina, Etelä-Korea, Malesia, Singapore, Intia ja Taiwan, myös Yhdysvallat • Näyttö: Samsung, LG, Foxconn, Tianma, Sharp, Wintek • Akku: TDK ATL, Samsung, LG • Elektroniikka (sirut jne.): Foxconn, TSMC, Micron Technologies, Toshiba, Qualcomm, Renesas • Runko (kokoonpano): Foxconn, Pegatron
Laitteiden kokoaminen	Bosch, NXP, STMicroelectronics	• Pääasiassa Aasiassa: Kiina, Etelä-Korea, Malesia, Singapore, Intia, Vietnam ja Taiwan, Brasilia • Yritykset: Foxconn, Samsung, Sony, LG, Huawei, Xiaomi, Oppo, Pegatron, Wistron, Compal, Wingtech, Huaqin, Longcheer
Käyttövaihe, sis. myynnin	• Myynti: Palveluntarjoajat (operaattorit), tuotemerkin omistajat, jälleenmyyjät ja ostosverkkosivut • Kuluttajat, Yhdysvalloissa leasing ja puhelimen vaihto uuteen osana sopimusta	
Elinkaaren pidentäminen	• Kunnostus: osa valmistajista ja tuotemerkin omistajista, esim. Samsung ja Apple, muut yritykset esim. Recommerce Group ja Swappie • Uudelleenkäyttö: C2C-myynti useilla verkkoalustoilla, käytettyjen laitteiden myyjät	ei tämän tutkimuksen painopiste
Keräys ja kierrätys	• Kerääjät: televiestintäpalveluiden tarjoajat (operaattorit), kunnat, valmistajat, kierrätys-yritykset ja jälleenmyyjät • Kierrätysyritykset: Umicore, Boliden, Stena Recycling, Kuusakoski	ei tämän tutkimuksen painopiste
Hävittäminen	• Kuluttajat: Horros tai hävittäminen sekajätteessä • Yritykset: älypuhelinten vienti käytettyinä puhelimina tai SER:na	ei tämän tutkimuksen painopiste

3.2.2 Älytelevisio

Älytelevisioiden liikevaihdoksi vuonna 2021 arvioidaan 145,42 miljardia euroa, josta suurin osa syntyy Kiinassa (37,7 miljardia euroa vuonna 2021). Älytelevisioiden globaalien markkinoiden odotetaan kasvavan. Vuonna 2025 liikevaihdoksi ennustetaan 248,4 miljardia euroa, ja myytyjen yksiköiden määrä kasvaa 293,32 miljoonalla. Myynnin näkökulmasta tällä hetkellä hallitseva näyttöteknologia on LCD, jonka jälkeen tulevat QLED ja OLED. 4K- ja 8K-resoluutiolla varustettujen televisioiden markkinoille tuloa ja OLED- ja QLED-näyttöihin siirtymistä pidetään älytelevisioteollisuuden nousevina trendeinä. (Grand View Research 2017a, Grand View Research 2017b, Digital TV Europe 2020)

Älytelevisiosektorin keskeiset brändiyritykset tulevat pääosin Etelä-Koreasta, Kiinasta ja Japanista: Koninklijke Philips NV (Alankomaat), LG Electronics Inc., Panasonic Corp., Qingdao Haier Co. Ltd., Samsung Electronics Co. Ltd., Sharp Corp., Sony Corp., Videocon Industries Ltd., VIZIO Inc. ja Xiaomi Corp (Technavio 2020). Samsung ja LG valmistavat omat (O)LED-paneelinsa, kun taas Sony ja Panasonic hankkivat paneelinsa LG:ltä. Viime vuosina kiinalaisyritykset ovat tulleet mukaan myös valmistusmarkkinoille. (Grand View Research 2017a)

Tapaus OLED

OLED-näyttöjä käytetään laajasti älypuhelimissa ja älytelevisioissa. OLED-näyttöjen liikevaihdon ennustetaan kasvavan vuoden 2020 26,4 miljardista eurosta 42,5 miljardiin euroon vuonna 2025. Summa kattaa älypuhelimet, älytelevisiot ja muut käyttötapaukset (esim. autojen näytöt). OLED-televisioiden oletetaan muodostavan 58 % koko OLED-paneelipinta-alasta vuoteen 2025 mennessä. (DSCC 2020)

OLED-materiaalin myynnin odotetaan kasvavan 17 % vuodessa, kunnes se vuonna 2023 on 1,9 miljardia euroa (DSCC 2019). OLED-näyttöjen pääraaka-aine on kvartsihiekka, josta valmistetaan alumiinisilikaattilasia. Se koostuu 99,5-prosenttisesti piistä, mutta joukossa on myös alumiinia, natriumia ja magnesiumia. Keskeiset globaalit kvartsihiekkayritykset ovat Sibelico (Belgia), US Silica (Yhdysvallat), Emerge Energy (Yhdysvallat), Badger Mining (Yhdysvallat) ja Wuxi Quechen Silicon Chemical Co. (Kiina).

OLED-arvoketjussa on useita yrityksiä. OLED-näyttöjen materiaaliseosten ja kemiallisten yhdisteiden tärkeimmät tuottajat ovat UDC (Yhdysvallat), Merck (Yhdysvallat), Novaled (Etelä-Korea), Idemitsu Kosan, SFC, LG Chem, DowDuPont, Sumitomo, Duksan Neolux, Samsung SDI ja muut (Macro polo 2021, Bardsley Consulting ja muut 2014). Muita kriittisiä toimijoita ovat valmistuslaitteiden toimittajat ja testausyritykset, esim. Canon, Seiko Epson, Coherent, Applied materials, Beneq ja Laytec, jotka toimivat Euroopassa, Aasiassa ja Yhdysvalloissa. OLED-näyttöjen valmistus on keskittynyt Etelä-Koreaan, ja myös Kiinassa ja Japanissa on vähäistä tuotantoa. Samsung on tällä hetkellä suurin OLED-valmistaja. Muita toimittajia ovat LG sekä kiinalaiset yritykset kuten BOE ja China Star Optoelectronics Technology.

Näyttölasin valmistuksessa keskeisiä yrityksiä ovat Corning (Yhdysvallat), Asahi Glass (Japani) ja Nippon Electric Glass (Japani). Mikropiirejä valmistavat esimerkiksi Samsung (Etelä-Korea), Novatek (Taiwan), Himax (Taiwan), Silicon Works (Etelä-Korea) ja Synaptics (Yhdysvallat).

OLED-näyttöjen keskeisiä komponentteja ovat lasista tai muovikalvosta valmistetut substraatit ja orgaaniset puolijohdemolekyylit, jotka sijaitsevat substraatissa ja substraatin molemmin puolin sijaitsevissa elektrodeissa (katodi ja anodi). Muita tärkeitä komponentteja ovat kapselointimateriaalit, kuten tiivistemassa ja kuorilasi.

OLED-näyttöjen orgaanisia materiaaleja tuottavat muun muassa Sumitomo Chemical, Konica Minolta, DuPont, Pioneer, Universal Display Corporation (UDC) ja Merck. Tarkempi luettelo OLED-materiaalien toimittajista löytyy Taulukosta 11.

Taulukko 11. Älytelevisioarvoketjun keskeiset toimijat - Painopisteenä OLED-näytöt.

Arvoketjun osa	Eurooppa	Muu maailma
Raaka-aineiden louhinta	Barium: Sachtleben Bergbau, M-I SWACO Kromi: Outokumpu Kupari, sinkki, hopea: KGHM Polska Miedz, Boliden, Terrafame, Lundin Mining Kulta: AgnicoEagle, Boliden Rauta: LKAB Magnesium: Grecian Magnesite, Magnesitas De Rubián, Magnesitas Navarras, Nedmag, SLOVMAG, SMZ Nikkeli, koboltti, palladium: Terrafame, Boliden Piimetalli: Elkem Piihiekka: Sibelco, Hoffmann Mineral, Brogardsand, Elkem, CAOBAR Strontium: Canteras Industriales, Solvay Titaani: Kronos	Yritykset: Rio Tinto, BHP, Vale, AngloAmerican, Barrick, Freeport-McMoran, Jinchuan, Impala Platinum, SibayneStillwater, FQM, Vedanta, Zijin Mining Tärkeimmät muut kuin eurooppalaiset tuottajat löytyvät Taulukosta 2. Pii • US Silica (Yhdysvallat) • Emergy energy (Yhdysvallat) • Badger Mining (Yhdysvallat) • Wuxi Quechen Silica (Kiina)
Materiaaliseosten ja kemiallisten yhdisteiden valmistaminen	• **Orgaaniset pinomateriaalit** **– BASF, Merck, Novaled** • **Substraatit** **– St. Gobain, ArcelorMittal, Schott** • **Kapselointimateriaalit** **– Henkel, Delo**	• **Maat:** Yhdysvallat, Japani, Etelä-Korea, Kiina • **Orgaaniset pinomateriaalit** – Sumitomo Chemical, Konica Minolta, DuPont, Pioneer, Universal Display Corporation (UDC) ja Merck • **Substraatit** – Pilkington, DuPont, LG Chem, Asahi Glass, PPG • **Kapselointimateriaalit** – Samsung, DuPont, UDC, 3M
Komponenttien valmistus	• **Valmistuslaitteet ja testaus:** – Laytec, Beneq	• **Maat:** Etelä-Korea, Kiina, Japani, Yhdysvallat • **OLED-paneelit:** • Samsung, LG, Sharp, Hisense Group, TCL, BOE, OLEDWorks • **Paneelien valmistuslaitteet ja testaus:** – Canon, Seiko Epson, Coherent, Applied Materials
Laitteiden kokoaminen	• esim. Samsung kokoaa älytelevisioita useissa Euroopan maissa (esim. Slovenia, Unkari ja Romania)	• **Maat:** Etelä-Korea, Kiina, Brasilia, Intia, Yhdysvallat • **Yritykset:** Samsung, LG, Sony, Panasonic, Videocon industries
Käyttövaihe, sis. myynnin	• Myynti: Vähittäismyyjät, tuotemerkin omistajat • Kuluttajat	
Elinkaaren pidentäminen	• Kunnostus: valmistajat ja tuotemerkin omistajat, vähittäismyyjät • Uudelleenkäyttö: useita kierrätysverkkoalustoja	ei tämän tutkimuksen painopiste
Keräys ja kierrätys	• Kerääjät: tuotemerkin omistajat, kunnat, tuottajat ja muut vähittäismyyjät • Kierrätysyritykset: Umicore, Boliden, Kuusakoski	ei tämän tutkimuksen painopiste
Hävittäminen	• Kuluttajat: Horros tai hävittäminen	ei tämän tutkimuksen painopiste

Orgaanisten materiaalien osalta (Bardsley Consulting ja muut 2014):

- Jätteen minimointi on tärkeä tavoite, esim. ”tuotantoketjuun mukaan tulevista arvokkaista metalleista, kuten iridiumista tai platinasta, alle 1 % päätyy mukaan lopulliseen OLED-tuotteeseen”.
- Suorituskykyisten kemikaalien kehittämiskustannukset muodostavat suuren osan avainmateriaalien myyntihinnasta – esim. johtavan tason fosforoivat seostusaineet ja siirtotason ioniseostusaineet, jotka sisältävät iridiumia ja muita kriittisiä raaka-aineita, vaikkakin vain pieniä määriä
- Fosforoivien seostusaineiden päävalmistaja on UDC ja ioniseostusaineiden päävalmistaja on Novaled, joka käyttää BASF:n tuottamia materiaaleja.

Substraattien päämateriaaleja ovat boorilasi ja muovisubstraatit. Substraatteja tuottavat sellaiset lasinvalmistajat kuin PPG, Asahi Glass, Pilkington (Nippon Sheet Glass) ja Guardian Industries, jotka myös kehittävät substraattiratkaisuja. Agfa, BASF, DuPont Teijin Films ja Samsung tutkivat kirkkaita muovisubstraatteja. (Bardsley Consulting ja muut 2014)

Älytelevisioita kootaan useissa maissa ja maanosissa. Esimerkiksi Samsung kokoaa älytelevisioita ainakin 11 maassa, myös EU:ssa (Tab tv 2019). Toisin kuin älypuhelimia, älytelevisiota käyttää yleensä vain yksi kuluttaja, minkä jälkeen ne heitetään pois. Myös älytelevisioiden keräys- ja kierrätyspolut vastaavat älypuhelinten polkuja. Taulukko 11 esittelee joitain älytelevision arvoketjun keskeisiä toimijoita.

3.3 Pääelementit ja raaka-ainekoostumus

Neitseellisten raaka-aineiden louhinnan ja prosessoinnin yhteiskunnallisia ja ympäristövaikutuksia käsitellään laajemmin tämän raportin 2. osassa. Vaikka ICT-laitteiden valmistus on vastuussa useimmista ympäristövaikutuksista, neitseellisten raaka-aineiden louhinta ja prosessointi voi sekin olla merkittävä tekijä, varsinkin kullan, hopean, palladiumin ja muovin osalta (Rizos ja muut 2019). Esimerkiksi yhden älypuhelimen valmistamista varten täytyy louhia noin 260 kertaa älypuhelimen painon verran kiveä (ibid.) Uusioraaka-aineiden käyttö voi vähentää raaka-aineiden käytön ympäristövaikutuksia merkittävästi. Esimerkiksi koboltin louhinta käyttää energiaa 140–2 100 megajoulea energiaa materiaalikiloa kohden, kun taas romumetallissa energiankäyttö on vain 20–140 megajoulea kiloa kohden (Rizos ja muut 2019).

3.3.1 Älypuhelin

Puhelimen elektroniikkaan tarvitaan useita alkuaineita ja yhdisteitä. Siru eli puhelimen prosessori valmistetaan puhtaasta piistä. Pii ei johda sähköä, ellei siihen lisätä muita alkuaineita. Tässä lisäyksessä piitä pommitetaan esim. fosforilla, antimonilla, arseenilla, boorilla, indiumilla ja galliumilla. Puhelimen mikrokomponentit ja johdotus ovat pääasiassa kuparia, kultaa ja hopeaa. Myös tantaalia käytetään, ja se on mikrokondensaattorien pääaine. (Compound Interest 2014) Älypuhelimissa painettu piirilevy sisältää 90 % mitatusta kullasta, 98 % kuparista, 99 % palladiumista, 86 % indiumista ja 93 % tantaalista. Älypuhelimen painetun piirilevyn kulta-, palladium-, kupari-, platina-, tantaali-, indium- ja galliumpitoisuudet ovat merkittävästi suurempia kuin tällä hetkellä louhittavien esiintymien metallipitoisuudet. (Bookhagen ja muut 2020)

Aiemmin juote oli pääasiassa tinaa ja lyijyä, mutta viime vuosina on yritetty löytää lyijyttömiä vaihtoehtoja, joista useissa yhdistetään tinaa, hopeaa ja kuparia. Puhelimen mikrofonissa, kameroissa, värinäyksiköissä (ilmoitukset ja haptinen palaute) ja kaiuttimessa on magneetteja, jotka on yleensä valmistettu neodyymirautabooriseoksesta. Seoksessa on usein myös dysprosiumia ja praseodymiumia. (Muller 2013, Compound Interest 2014) Magneeteissa on 96 % laitteen harvinaisista maametalleista ja 40 % mitatusta galliumista, ja pitoisuudet ovat suurempia kuin REE- ja galliumesiintymissä. Kuparin ja germaniumin osalta älypuhelinten (akut poisluettuna) metallipitoisuus on usein esiintymää matalampi. (Bookhagen ja muut 2020)

Kosketusnäytöt valmistetaan pääasiassa alumiinisilikaattilasista, joka on alumiini- ja piioksidin seos. Lasin päälle levitetään läpinäkyvä, yhtenäinen kerros indiumtinaoksidia, jonka avulla lasista tulee kosketusnäyttö. Myös harvinaisia maametalleja on näytöissä hyvin pieniä määriä. Niiden avulla näyttö pystyy tuottamaan värejä. (Compound Interest 2014, Muller 2013)

Suurin osa nykyajan puhelimista käyttää litium-ioniakkuja. Akun positiivisessa elektrodissa käytetään yleensä litiumkobolttioksidia, ja negatiivinen elektrodi on grafiittia. Itse akku sijoitetaan yleensä alumiinikoteloon. (Compound Interest 2014)

Tyypillinen puhelimen runko on yleensä ruostumatonta terästä tai alumiinia ja takakansi lasia. Halvoissa puhelimissa voi olla myös muovikuori. Kuorissa on usein palonestoaineita. Usein nämä ovat edelleen bromattuja yhdisteitä, mutta näiden käyttöä pyritään vähentämään ja siirtymään orgaanisten yhdisteiden käyttöön (Muller 2013, Compound Interest 2014).

Nykyaikaisessa älypuhelimessa on noin 40–80 eri alkuainetta (Kuva 14). Applen mukaan 90 %:ssa yrityksen vuonna 2019 toimittamista puhelimista oli 14 materiaalia. Näitä olivat alumiini, koboltti, kupari, lasi, kulta, litium, paperi, muovi, harvinaiset maametallit, teräs, tantaali, tina, volframi ja sinkki (Apple 2021). Bookhagen ja muut (2020) mukaan keskimääräisessä älypuhelimessa on 45 % metalleja, 32 % lasia, 17 % muovia ja 6 % muita aineita eli materiaaleja, joita ei voida mekaanisesti erotella.

Taulukko 12 esittelee älypuhelinten keskeiset elementit, kuten esittävät Rizos ja muut (2019), Bookhagen ja muut (2020) ja Proske ja muut (2020).

Älypuhelinten raaka-ainesisällössä on huomattavaa vaihtelua. Esimerkiksi rautasisältö vaihteli 3,69 grammasta 31,66 grammaan niissä älypuhelimissa, joita Bookhagen ja muut tutkivat (2020). Painoa tarkasteltaessa hallitsevat muovi, alumiini, kupari ja teräs sekä määrittelemätön ”muut”-kategoria. Usea sellainen materiaali, jota on vain pieni määrä puhelimen kokonaispainosta, on merkittävää taloudellisen arvon, saantiriskien tai louhinnan ympäristö- ja yhteiskuntahuolien vuoksi (Rizos ja muut 2019). Älypuhelinten raaka-aineiden kokonaismääristä saa kokonaiskuvan tutkimuksesta, jossa Gurita ja muut (2018) arvioivat vuosina 2009–2015 Saksassa markkinoille tulleiden älypuhelinten seitsemän keskeisen arvokkaan tai kriittisen metallin kokonaismäärän. Määrät olivat seuraavat: kultaa 3,46 tonnia, hopeaa 35,13 tonnia, palladiumia 1,27 tonnia, kobolttia 725,58 tonnia, galliumia 1,04 tonnia, praseodyymia 1,15 tonnia ja neodyymia 5,76 tonnia (ibid.). Taulukko 13 esittää matkapuhelinten raaka-aineiden ja välituotteiden lähteet.

Taulukko 12. Älypuhelinten keskeiset elementit. Rizos ja muut (2019) mukaan esimerkkiälypuhelin painaa 164 g ja ”muut”-kategoriassa ovat lasi, liimat jne. Bookhagen ja muut (2020) eivät ottaneet huomioon älypuhelimen akkua, ja heidän tutkimuksessaan älypuhelimen keskipaino on 110 g. Fairphonen osalta tiedot perustuvat toimittajien ilmoittamaan materiaaliluetteloon (BOM), jossa myös elektronisten komponenttisen sisällä olevat raaka-aineet otetaan huomioon ja kokonaispaino on 190,4 g (Proske ja muut 2020). Osuudet ja kokonaismassa ovat tekijöiden omia laskelmia ja perustuvat viitattujen julkaisuiden tietoihin.

Materiaalityyppi	Paino materiaalityypin mukaan (% kokonaisuudesta)	Alkuaine	Keskimääräinen paino (% kokonaisuudesta) (Rizos ja muut 2019)	Arviot keskimääräisestä painosta (% kokonaisuudesta) (Bookhagen ja muut 2020)	Fairphonen paino (% kokonaisuudesta) (Proske ja muut 2020)
Metallit	49,5 (45 %) – 73,39 g (44,8 %)	Alumiini	31,89 g (19,4 %)	5–15 g (4,5–13,6 %)	
		Kupari	14,26 g (8,7 %)	7–11 g (6,4–10,0 %)	8,145 g (4,3 %)
		Rauta / teräs	14,02 g (8,5 %)	3,69–31,66 g (3,4–28,8 %)	
		Piimetalli		10 g (9,1 %)	
		Koboltti	8,35 g (5,1 %)	0,01–0,1 g (<0,1–0,1 %)	11,24 g (5,9 %)
		Nikkeli		0,8–6 g (0,7–5,5 %)	
		Magnesium	3,26 g (2,0 %)	0,2–20 g (0,2–18,2 %)	
		Kromi		0,005–8 g (<0,1–7,3 %)	
		Litium	0,93 g (0,6 %)		5,2 g (2,7 %)
		Volframi	0,30 g (0,2 %)	0,1–1 g (0,1–0,9 %)	0,013 g (<0,1 %)
		Hopea	0,21 g (0,1 %)	0,01–0,1 g (<0,1–0,1 %)	0,044 g (<0,1 %)
		Tina	0,1 g (<0,1 %)	0,7–1 g (0,6–0,9 %)	2,48 g (1,3 %)
		Sinkki		0,1–1 g (0,1–0,9 %)	
		Strontium		0,1–1 g (0,1–0,9 %)	
		Barium		0,1–1 g (0,1–0,9 %)	
		REE (esim. neodyymi)		0,1–1 g (0,1–0,9 %)	0,17 g (<0,1 %)
		Mangaani		0,1–1 g (0,1–0,9 %)	
		Titaani		0,1–1 g (0,1–0,9 %)	
		Molybdeeni		0,01–0,1 g (<0,1–0,1 %)	
		Zirkonium		0,01–0,1 g (<0,1–0,1 %)	
		Kulta	0,03 g (<0,1 %)	0,01–0,1 g (<0,1–0,1 %)	0,143 g (<0,1 %)
		Tantaali	0,02 g (<0,1 %)	0,01–0,1 g (<0,1–0,1 %)	
		Palladium	0,01 g (<0,1 %)	<0,01 g (<0,1 %)	0,0075 g (<0,1 %)
		Indium	0,01 g (<0,1 %)	<0,01 g (<0,1 %)	
Lasi	35,2 g (32 %)				
Muovit	18,7 (17 %) – 33,74 g (20,6 %)				
Muut	6,6 (6 %) – 57,23 g (34,9 %)				

Taulukko 13. Matkapuhelinten raaka-aineiden ja välituotteiden lähteet tuoreimman saatavilla olevan tiedon perusteella (2018–2020 tiedot). Huomaa, että Suomesta ja koko Euroopasta on hyvin vähän, jos lainkaan tietoa siitä, miten paikallisia ICT-laitteiden tuotannossa käytetyt raaka-aineet todella ovat.

	Kaivoksista näiltä alueilta (suhteessa globaaliin tuotantoon)			Raaka-ainetta käytetään materiaaliseoksissa ja kemiallisissa yhdisteissä, joiden valmistusmaa/alue on:		
	Suomi	**Muu Eurooppa[1]**	**Muu maailma (suurimmat tuottajat)[1,2,3]**	**Suomi**	**Muu Eurooppa [5,6]**	**Muu maailma (maa mainitaan, jos hallitseva)[5,6]**
Ag	Hyvin vähän	Keskitaso: POL, SWE, SPA	MEX, PERU, CNA, RUS, PLD, AUS, CHI	Hopeaharkot	Hopeaharkot	Hopeaharkot, juotto- ja kovajuottometalliseokset, johtometalliseokset, hopeaoksidi
Al[4]	0	Pieni: GRE	AUS, GUI, CHI, BRA	Alumiiniharkot	Alumiiniharkot, seokset	Alumiiniharkot (CNA), puhdas alumiinioksidi, seokset, Li-Ni-Co-Al-oksidi
Au	Pieni	Pieni: BUL, SWE	CNA, AUS, RUS, USA, CND	Kultaharkot; inertit sähkö-johdinseokset	Doré-harkot ja puhtaat kultaharkot; inertit sähkö-johdinseokset	Doré-harkot ja puhtaat kultaharkot; inertit sähkö-johdinseokset
Ba[4]	0	Pieni: GER, UK	USA, INA, MOR	?	Bariumkarbonaatti	Bariumkarbonaatti
Ca	Pieni	Keskitaso	CNA, USA, INA[7]	Kalsiumoksidi ja -hydroksidi	Kalsiumoksidi ja -hydroksidi, metalliseokset	Kalsiumoksidi ja -hydroksidi, metalliseokset
Cl	0	Keskitaso: GER, FRA	CNA, USA; INA[8]	Kloorikaasu	Kloorikaasu, puhtaat CL-suolat	Kloorikaasu, puhtaat CL-suolat
Co	Pieni	0	DRC (RUS, AUS, PHI)	Kobolttisul-faatti ja muut Co-kemikaalit, Co-metalli	Seokset, Co-metalli, Co-sulfaatti ja muut Co-kemikaalit	Seokset (CNA), kobolttimetalli, Co-sulfaatti (CNA), Li-Ni-Co-Al-oksidi
Cr	Pieni	0	RSA, KAZ, TUR	Ruostumaton teräs	Ruostumaton teräs	Ruostumaton teräs (CNA), ei-rautaseokset
Cu	Pieni	Keskitaso: POL, SWE, SPA, BUL	CHI, PERU, CNA, DRC, USA, AUS	Kuparimetalli, ultrapuhdas kupari, seokset	Kuparimetalli, ultrapuhdas kupari, seokset	Kuparimetalli, ultrapuhdas kupari, seokset
Fe	0	Pieni: SWE	AUS, BRA, CNA, INA	Hiiliteräs, ruostumaton teräs	Hiiliteräs, ruostumaton teräs	Hiiliteräs (CNA), ruostumaton teräs (CNA), litiumionifosfaatti
In	0	Todennäköisesti hyvin vähän (sinkin sivutuote)	CHI, KOR	0	Indiummetalli, juote ja muut seokset	Indiummetalli, juote ja muut seokset, indiumtinaoksidi (CNA, KOR), In-fosfidi, In-Ga-arsenidi, In-Ga-nitridi
Li	0	Pieni: POR	AUS, CHI, CNA	0	Litiumkarbonaatti, litiumhydroksidi[9]	Litiumoksidi (CNA, USA, CHI), Li-karbonaatti (CNA, USA, CHI, ARG, AUS), Li-hydroksidi (CNA, ARG, AUS). Li-Co-oksidi ja muut litiumyhdisteet (CNA, KOR, JPN)
Mg[4]	0	Pieni: SPA, AUT, SLO, GRE	CHI, BRA, RUS, TUR	Seokset?	Seokset	Mg-metalli (CNA 90 %), vahvat kevytmetalliseokset
Mn	0	Hyvin vähän: ROM	RSA, AUS, GAB,	Teräs	Teräs, ei-rautaseokset, mangaanioksidi	Teräs, ei-rautaseokset, mangaanioksidi, hyvin puhdas Mn, elektrolyyttiset Mn-hiutaleet, Li-Ni-Mn-Co-oksidi, Li-Mn-oksidi

Taulukko 13. Jatkuu.

	Kaivoksista näiltä alueilta (suhteessa globaaliin tuotantoon)			Raaka-ainetta käytetään materiaaliseoksissa ja kemiallisissa yhdisteissä, joiden valmistusmaa/alue on:		
	Suomi	**Muu Eurooppa[1]**	**Muu maailma (suurimmat tuottajat)[1,2,3]**	**Suomi**	**Muu Eurooppa [5,6]**	**Muu maailma (maa mainitaan, jos hallitseva)[5,6]**
Mo	0	Hyvin vähän: POL	CNA, CHI, USA, PERU	?	Hiiliteräs, ruostumaton teräs	Hiiliteräs, ruostumaton teräs
Ni	Pieni	0	IND, PHI, RUS, AUS	Nikkelimetalli, ruostumaton teräs, nikkeli-sulfaatti	Nikkelimetalli, ruostumaton teräs, nikkelisulfaatti	Nikkelimetalli, ruostumaton teräs, ei-rautaseokset, Ni-sulfaatti, Li-Ni-Mn-Co-oksidi, Li-Ni-Co-alumiinioksidi
Pd	Hyvin vähän	0	RUS, RSA, CND	Palladium-harkot ja -jauhe	Palladiumharkot ja -jauhe	Palladiumharkot ja -jauhe, korkeissa lämpötiloissa vakaat johdinseokset, palladiumlevityssuolat
REE	0	0	CHA, USA, BUR, AUS	0	Seokset, oksidit, yksittäiset metallit	REE-oksidit, -karbonaatit ja -seokset ja yksittäiset REE-metallit (CNA > 80 %)
Si-metalli[4]	0	Pieni: NOR	CNA, RUS, USA, BRZ	Piikiteet	Piimetalli, piikiteet	Piimetalli (CNA), piikiteet, piikemikaalit, piikiekot
Sn	0	Hyvin vähän: UK, POR, SPA	CNA, INS, BUR, PERU, BRZ, BOL	?	Tinaharkot, messinki, pronssi	Tinaharkot, juoteseokset, indiumtinaoksidi, messinki, pronssi
Sr	0	Suuri: SPA	CNA, MEX, IRA	?	Strontium-karbonaatti	Strontiumkarbonaatti
Ta	0	0	CNG, BRA, RWA, NIG	?	Tantaalimetalli ja pentoksidi, superseokset	Tantaalimetalli ja pentok-sidi, superseokset, karbidit, kemikaalit
Ti	0	Keskitaso: NOR	CNA, RSA, AUS, CND	Teräs	Teräs, kevytseokset	Teräs, kevytseokset. Titaanisieni ja -harkot (CNA, RUS, JPN)
W	0	Pieni: SPA, POR	CNA (VTN, RUS, BOL)	Teräs	Teräs, ei-rautaseokset, volframimetalli ja kemikaalit	Teräs, ei-rautaseokset, volframijauhe ja volframikemikaalit (CNA)
Zn	Pieni	Keskitaso: SWE, IRE, SPA, POR	CNA, AUS, PERU, IND, USA	Sinkkiharkot, ei-rautaseokset	Sinkkiharkot, ei-rautaseokset, sinkkisulfaatti	Sinkkiharkot (CNA), ei-rautaseokset, sinkkisulfaatti
Zr	0	0	AUS, RSA, CNA, MOZ	?	Zirkoniumoksidi, zirkoniummetalli	Zirkoniumoksidi, zirkoniummetalli

1 USGS (2021)

2 Brown ja muut (2021)

3 ARG = Argentiina, AUS = Australia, BOL = Bolivia, BRA = Brasilia, BUL = Bulgaria, BUR = Myanmar, CHI = Chile, CNA = Kiina, CND = Kanada, CNG = Kongon demokraattinen tasavalta, GAB = Gabon, INA = Intia, IND = Indonesia, IRA = Iran, JPN = Japani, KAZ = Kazakstan, KOR = Etelä-Korea, MEX = Meksiko, MOR = Marokko ja Länsi-Sahara, MOZ = Mosambik, NIG = Nigeria, NL = Alankomaat, NOR = Norja, POR = Portugali, RSA = Etelä-Afrikka, RUS = Venäjä, RWA = Ruanda, SPA = Espanja, SWE = Ruotsi, TUR = Turkki, UK = Iso-Britannia, UKR = Ukraina, VTN = Vietnam

4 Louhittu esiintymä: Al: bauksiitti (alumiinimalmi), Ba: baryytti, Mg: magnesiumsuolat, Piimetalli: kvartsi

5 Eynard ja muut (2020)

6 Latunussa ja muut (2020)

7 Hankitaan karbonaattikivestä, jota on runsaasti kaikkialla maailmassa. Hyvin pieni osa louhitusta karbonaattikivestä käytetään metallisen kalsiumin tuotantoon. Siksi eniten karbonaattikiveä louhivat maat eivät ole tässä yhteydessä tärkeitä.

8 Kloori hankitaan natrium- ja kalisuoloista, joista vain hyvin pieni osa käytetään kloorin tuotantoon. Cl-louhinnan sarakkeissa kuvattu tuotanto tarkoittaa suolojen tuotantoa.

9 Tähän mennessä vain 1 % Euroopassa käytetystä litiumista on käytetty akkuihin (Latunussa ja muut 2020).

3.3.2 Älytelevisio

Älytelevisioiden raaka-ainekoostumukset vaihtelevat näyttöpaneeliteknologian sekä älytelevision tuotemerkin ja mallin mukaan. Tutkimusten ja tietolähteiden välillä on myös eroja. Kun tarkastellaan painoa, älytelevision päämateriaali on lasi. Näytön väriä parannetaan ceriumilla. Elektroniikka ja kuoret koostuvat muoveista, kuparista, tinasta, sinkistä, piistä, kullasta ja kromista. (Techwalla 2021)

Esimerkiksi plasmatelevision raaka-ainesisältö on 29 % lasia, 21 % terästä, 19 % alumiinia, 10 % muoveja, 1 % kuparia ja loput 20 % muuta (Panasonic 2019). Plasmatelevision näytön muodostavissa kennoissa käytetään neon-, ksenon- ja argonkaasuja sekä fosforikaasua (Techwalla 2021). Esimerkki-LCD-television raaka-ainesisältö on 43 % terästä, 33 % muovia, 11 % lasia, 2 % alumiinia ja loput 11 % muuta (Panasonic 2019). LCD-television pääkomponentti eli LCD-paneeli koostuu seuraavista: Si (25,4 %), Al (7,55 %), Ca (4,7 %), Sr (3,7 %), Mg (0,9 %), Cl (0,1 %), Sn (0,09 %), Fe (0,08 %), P (0,05 %) ja In (0,03 %) (De la Torre ja muut 2018). Taulukko14 esittelee LCD- ja LED-televisioiden sisällön, keskeisiä alkuaineita kuten indiumia, harvinaisia maametalleja ja jalometalleja painottaen.

Taulukko 14. LCD- ja LED-television raaka-ainekoostumus (tiedot: Buchert ja muut 2012). Painopisteenä tietyt jalometallit ja kriittiset raaka-aineet.

Raaka-aine	Sisältö LCD-TV:tä kohden (mg)	Sisältö LED-TV:tä kohden (mg)	Esiintyminen
Hopea (Ag)	575	575	Elektroniikka (PCB, koskettimet, johdotus)
Kulta (Au)	138	138	Elektroniikka (PCB, koskettimet, johdotus)
Indium (In)	254	254	Näyttö
Palladium (Pd)	44	44	Elektroniikka (PCB, koskettimet, johdotus)
Yttrium (Y)	110	4,8	Näyttö
Gallium (Ga)	0	4,9	Näyttö
Europium (Eu)	8,1	0,09	Näyttö
Lantaani (La)	6,8	0	Näyttö
Cerium (Ce)	4,5	0,3	Näyttö
Gadolinium (Gd)	0,63	2,3	Näyttö
Terbium (Tb)	2,3	0	Näyttö
Praseodyymi (Pr)	<0,13	0	Näyttö

Televisioiden standardikoko on kasvanut huomattavasti, tutkimusajankohdan 35 tuumasta nykyhetken 55–65 tuumaan, joten voidaan olettaa, että raaka-aineiden kulutus yksikköä kohden on myös kasvanut dramaattisesti. Näytöt ja niihin liittyvä elektroniikka kuluttavat huomattavia määriä jalometalleja ja kriittisiä raaka-aineita. Prosumprojekti (Mathieux ja muut 2017) on kerännyt arvioita vuosittain markkinoille lasketuissa näytöissä olevista metallimääristä. Vuoden 2020 osalta arviot olivat seuraavanlaiset: Ag: 48 tonnia; Au: 12,5 tonnia; In: 16 tonnia; Nd: 35 tonnia; Pd: 2 tonnia. Taulukko 15 esittää älytelevisioiden raaka-aineiden ja välituotteiden lähteet.

Taulukko 15. Älytelevisioiden raaka-aineiden ja välituotteiden lähteet tuoreimman saatavilla olevan tiedon perusteella (2018–2020 tiedot). Huomaa, että Suomesta ja koko Euroopasta on hyvin vähän, jos lainkaan tietoa siitä, miten paikallisia ICT-laitteiden tuotannossa käytetyt raaka-aineet ovat.

Äly-TV	**Kaivoksista näiltä alueilta (suhteessa globaaliin tuotantoon)**			**Käytetään materiaaliseoksissa ja kemiallisissa yhdisteissä, joiden valmistusmaa/alue on:**		
	Suomi	**Muu Eurooppa[1]**	**Muu maailma (suurimmat tuottajat)[1,2,3]**	**Suomi**	**Muu Eurooppa**	**Muu maailma (maa mainitaan, jos hallitsevuus löytyi)[5,6]**
Ag	Hyvin vähän	Keskitaso: POL, SWE, SPA	MEX, PERU, CNA, RUS, PLD, AUS, CHI	Hopeaharkot	Hopeaharkot	Hopeaharkot, juotto- ja kovajuottometalliseokset, johdemetalliseokset, hopeaoksidi
Al[4]	0	Pieni: GRE	AUS, GUI, CHI, BRA	Alumiiniharkot	Alumiiniharkot, seokset	Alumiiniharkot (CNA), puhdas alumiinioksidi, seokset, Li-Ni-Co-Al-oksidi
Ar[7]	Pieni	Keskitaso: GER, UK, FRA, NL	USA, CNA, BRA, JPN	Puhdas argonkaasu	Puhdas argonkaasu	Puhdas argonkaasu
Au	Pieni	Pieni: BUL, SWE	CNA, AUS, RUS, USA, CND	Kultaharkot; inertit johdinseokset	Doré-harkot ja puhtaat kultaharkot; inertit johdinseokset	Doré-harkot ja puhtaat kultaharkot; inertit johdinseokset
Ca[8]	Pieni	Keskitaso	CNA, USA, INA	Kalsiumoksidi ja -hydroksidi	Kalsiumoksidi ja -hydroksidi, metalliseokset	Kalsiumoksidi ja -hydroksidi, metalliseokset
Cl[9]	0	Keskitaso	CNA, USA, INA	Kloorikaasu	Kloorikaasu, puhtaat Cl-suolat	Kloorikaasu, puhtaat kloorisuolat
Cr	Pieni	0	RSA, KAZ, TUR	Ruostumaton teräs	Ruostumaton teräs	Ruostumaton teräs (CNA), raudattomat metalliseokset
Cu	Pieni	Keskitaso: POL, SWE, SPA, BUL	CHI, PERU, CNA, DRC, USA, AUS	Kuparimetalli, ultrapuhdas kupari, seokset	Kuparimetalli, ultrapuhdas kupari, seokset	Kuparimetalli, ultrapuhdas kupari, seokset
Fe	0	Pieni: SWE	AUS, BRA, CNA, INA	Hiiliteräs, ruostumaton teräs	Hiiliteräs, ruostumaton teräs	Hiiliteräs (CNA), ruostumaton teräs (CNA)
In	0	Todennäköisesti hyvin vähän (sinkin sivutuote)	CHI, KOR	0	Indiummetalli, juote ja muut seokset	Indiummetalli, juote ja muut seokset, indiumtinaoksidi (CNA, KOR), Indiumfosfidi, In-Ga-arsenidi, In-Ga-nitridi
Mg[4]	0	Pieni: SPA, AUT, SLO, GRE	CHI, BRA, RUS, TUR	Seokset?	Seokset	Mg-metalli (CNA 90 %), vahvat kevytmetalliseokset
Ne[7]	0	Keskitaso: GER, UK, FRA	CNA, USA, RUS, UKR	0	Puhdas neonkaasu	Puhdas neonkaasu
P	Pieni	0	CNA, MOR, USA, RUS	0	0	Fosforisulfidit, -oksidit ja hyvin puhdas fosforihappo (CNA)
Pd	Hyvin vähän	0	RUS, RSA, CND	Palladiumharkot ja jauheet	Palladiumharkot ja jauheet	Palladiumharkot ja jauheet, korkeissa lämpötiloissa vakaat johdinseokset, palladiumpäälystesuolat
REE	0	0	CHA, USA, BUR, AUS	0	Seokset, oksidit, yksittäiset metallit	REE-oksidit, -karbonaatit ja -seokset ja REE-metallit (CNA > 80 %)

Taulukko 15. Jatkuu.

Äly-TV	**Kaivoksista näiltä alueilta (suhteessa globaaliin tuotantoon)**			**Käytetään materiaaliseoksissa ja kemiallisissa yhdisteissä, joiden valmistusmaa/alue on:**		
	Suomi	**Muu Eurooppa[1]**	**Muu maailma (suurimmat tuottajat)[1,2,3]**	**Suomi**	**Muu Eurooppa**	**Muu maailma (maa mainitaan, jos hallitsevuus löytyi)[5,6]**
Si-metalli[4]	0	Pieni: NOR	CNA, RUS, USA, BRA	Piikiteet	Piimetalli, piikiteet	Piimetalli (CNA), piikiteet, piikemikaalit, piikiekot
Sn	0	Hyvin vähän: UK, POR, SPA	CNA, INS, BUR, PERU, BRZ, BOL	?	Tinaharkot, messinki, pronssi	Tinaharkot, juoteseokset, indiumtinaoksidi, messinki, pronssi
Sr	0	Suuri: SPA	CNA, MEX, IRA	?	Strontium-karbonaatti	Strontiumkarbonaatti
Xe[7]	Pieni	Keskitaso: FRA, GER	USA, UKR, CNA, BRA, JPN	Puhdas ksenonkaasu	Puhdas ksenonkaasu	Puhdas ksenonkaasu
Zn	Pieni	Keskitaso: SWE, IRE, SPA, POR	CNA, AUS, PERU, IND, USA	Sinkkiharkot, raudattomat metalli-seokset	Sinkkiharkot, raudattomat metalliseokset, sinkkisulfaatti	Sinkkiharkot (CNA), raudattomat metalliseokset, sinkkisulfaatti

1 USGS (2021)

2 Brown ja muut (2021)

3 ARG = Argentiina, AUS = Australia, BOL = Bolivia, BRA = Brasilia, BUL = Bulgaria, BUR = Myanmar, CHI = Chile, CNA = Kiina, CND = Kanada, CNG = Kongon demokraattinen tasavalta, GAB = Gabon, INA = Intia, IND = Indonesia, IRA = Iran, JPN = Japani, KAZ = Kazakstan, KOR = Etelä-Korea, MEX = Meksiko, MOR = Marokko ja Länsi-Sahara, MOZ = Mosambik, NIG = Nigeria, NL = Alankomaat, NOR = Norja, POR = Portugali, RSA = Etelä-Afrikka, RUS = Venäjä, RWA = Ruanda, SPA = Espanja, SWE = Ruotsi, TUR = Turkki, UK = Iso-Britannia, UKR = Ukraina, VTN = Vietnam

4 Louhittu esiintymä: Al: bauksiitti (alumiinimalmi), Ba: baryytti, Mg: magnesiumsuolat, Piimetalli: kvartsi

5 Eynard ja muut (2020)

6 Latunussa ja muut (2020)

7 Jalokaasuja Ar, Ne ja Xe ei louhita, vaan ne erotetaan ilmasta (Elsner 2019).

8 Hankitaan karbonaattikivestä, jota on runsaasti kaikkialla maailmassa. Hyvin pieni osa louhitusta karbonaattikivestä käytetään kalsiumin tuotantoon. Siksi eniten karbonaattikiveä louhivat maat eivät ole tässä yhteydessä tärkeitä.

9 Kloori hankitaan natrium- ja kalisuoloista, joista vain hyvin pieni osa käytetään kloorin tuotantoon. Cl-louhinnan sarakkeissa kuvattu tuotanto tarkoittaa suolojen tuotantoa.

Kuparia ja kobolttia louhitaan pääasiassa globaalin etelän maissa kuten Perussa, Chilessä (Cu) ja Kongossa (Co). Etelä-Amerikassa kuparin louhinta on organisoitua ja kaivosyhtiöiden hallussa, kun taas Kongossa kobolttia tuottavat myös pienimuotoisesti toimivat kaivosmiehet, myös lapsityövoimalla. Kaivostoiminnan ympäristörajoitukset ovat globaalissa etelässä löysempiä kuin globaalissa pohjoisessa (esim. EU), joten kaivostoiminnan vaikutukset ovat suurempia aiempaan ryhmään kuuluvissa maissa. Tämä johtaa kestämättömään kaivostoimintaan ja ympäristön ja yhteiskunnan heikentymiseen.

3.4 Suunnittelu

Elektronisten laitteiden ympäristönäkökulman huomioivaa suunnittelua vauhdittavia tekijöitä on runsaasti. Näitä ovat muun muassa politiikat ja lainsäädäntö, kuluttajien kasvava tietoisuus sosiaalisista ja ympäristökysymyksistä sekä toimitusvarmuuteen liittyvät kysymykset. Politiikan näkökulmasta EU:n vihreä ja digitaalinen siirtymä yhdistää digitalisaation ja kestävän kehityksen, minkä tulisi taata, että käynnissä oleva digitaalinen kehitys ottaa jatkuvasti huomioon ympäristö- ja muut kestävyysvaikutukset.

Digitaaliset ratkaisut ovat keskeisiä kiertotalouden edistämisen ja tuotteiden ympäristöjalanjäljen pienentämisen kannalta. Digitalisaatio on myös keskeinen osatekijä ja mahdollistaja, kun halutaan integroida elinkaariajattelu tuote- ja

järjestelmäsuunnitteluun. Elinkaariajattelu voi johtaa parempaan energiatehokkuuteen, pienempään energiankulutukseen, raaka-aineiden ja tuotteiden parempaan jäljitettävyyteen sekä mahdollistaa tuotteiden elinkaaren pidentämisen ja kierrätettävyyden. On arvioitu, että tuotesuunnittelusta määräytyy jopa 80 % kaikista ympäristövaikutuksista, joita tuotteella sen elinkaaren aikana on (Schwarz ja muut 2017, European Commission 2014). Siksi kestävään kehitykseen perustuva, kiertotalouden huomioiva suunnittelu on niin tärkeää.

Elektronisten laitteiden suunnittelua halutaan uudistaa kestävyyttä ja kiertotaloutta tukevaan suuntaan, ja tähän on erilaisia lähestymistapoja. Näitä voivat esimerkiksi olla kierrätetyn materiaalin käytön lisääminen, myrkyttömien materiaalien valitseminen, vaikeasti kierrätettävien komposiittimateriaalien välttäminen, korjattavuuden, huollettavuuden ja kierrätettävyyden kehittäminen sekä elinkaaren pidentäminen. Ekosuunnittelu on suunnittelu- ja hallintamenetelmä, joka integroi mainitut kysymykset tuotesuunnitteluun ja siten ennakoivasti vähentää, välttää tai poistaa tuotteen elinkaaren eri vaiheissa syntyviä haitallisia ympäristövaikutuksia (Horn ja muut 2021). Elektronisissa laitteissa voidaan jo suunnitteluvaiheessa ottaa kattavasti huomioon esimerkiksi materiaalien suunnittelu ja valinta, laitteiden laskentateho ja käytetyt komponentit, komponenttien korjattavuus tai vaihdettavuus sekä materiaalien kierrätettävyys. Design-for-X-lähestymistavoissa painotetaan ennen kaikkea materiaalinkierrätystä edeltävien kierrätysvaihtoehtojen vahvistamista (Reuter ja muut 2018), esim. laitteiden tai komponenttien uudelleenkäytön tai korjaamisen hyödyntämistä. Käytetyillä raaka-aineilla ja kemikaaleilla on lisäksi käyttöturvallisuustiedotteet ja turvalliseen käsittelyyn tarvittavaa tietoa. Lainsäädännön tulisi varmistaa myös uusioraaka-aineiden turvallinen käyttö ja se, että vaarallisten kemikaalien, materiaalien ja tuotteiden käyttö ja läpinäkyvyys koko elinkaaren ajalta on riittävää.

Raaka-aineen matka digitaaliseksi laitteeksi on varsin pitkä: raaka-aineita tarvitaan materiaaleihin, materiaaleja komponentteihin ja komponentteja laitteisiin. Suunnittelua voidaan parantaa niin materiaalien, komponenttien kuin laitesuunnittelun osalta. Materiaalitasolla tehdään päätöksiä materiaalien kemiasta, alkuaineiden käytöstä tai siitä, että valitaan uusiutuvia raaka-aineita uusiutumattomien sijaan. Tällä hetkellä käytetään myös paljon vaikeasti kierrätettäviä komposiittimateriaaleja ja materiaaliseoksissa saatetaan käyttää myös haitallisia aineita. Komponenttitasolla digitaalisen tuotteen elinkaaren ympäristömyötäisyyttä voidaan tukea suunnittelemalla seoksia ja komponentteja uudelleen siten, että niiden korjaaminen helpottuu tai käyttää kierrätettyjä raaka-aineita. Lisäksi voidaan tukea digitaalisten tuotepassien käyttöönottoa, joiden avulla tuotteita voidaan seurata niiden koko elinkaaren ajan, jolloin niiden avulla voidaan tukea kiertotaloutta, vahvistaa materiaalinkierrätystä edeltäviä kierrätysvaihtoehtoja ja tukea tehokasta kierrätystä. Ekosuunnittelussa tarvitaankin hyvin kattavaa näkemystä, jotta ymmärretään suunnitteluvalintojen vaikutukset myös esimerkiksi tuotantoketjulle ja raaka-aineiden kysynnälle.

Luttroppin ja Lagerstedtin (2006) esittämät ekosuunnittelusäännöt ovat esimerkkejä tavoista, joilla helpotetaan kohtuullisten ympäristövaatimusten integroimista tuotekehitysprosessiin. Ne tarjoavat yhteisen perustan, jota voidaan käyttää tuotesuunnittelun kehityshaasteisiin. Näissä ohjeissa käsitellään myrkyllisten aineiden käyttöä, tuotannon tehokkuutta, painon vähentämistä, korjattavuutta, pitkäikäisyyttä, materiaalivalintoja, modulaarisuutta ja käyttöoppaiden saatavuutta, päivitettävyyttä sekä seossuunnittelua.

Ekosuunnittelun toteuttamiseen on myös useita muita ohjeita tai kehyksiä, joita luetteloivat esimerkiksi Rossi ja muut (2016) ja Horn ja muut (2021). Nämä tukityökalut voidaan jakaa esimerkiksi seuraaviin ryhmiin:

- Elinkaaripohjaiset lähestymistavat (esim. virtaviivaistetut LCA-työkalut),
- Ympäristölaajennetut tietokoneavusteiset suunnittelu- tai prosessimallinnukset (tietokoneavusteiset suunnittelutyökalut, jotka sisällyttävät ympäristökriteerit suunnitteluvaiheeseen: EcoCAD, HSC Sim),
- Matriisityökalut (MECO- tai MET-matriisit),
- Tarkastuslistat (ekosuunnittelusäännöt),
- Design-for-X lähestymistapa (Design-for-X ja muut toteutus- ja integrointityökalut, esim. ekosuunnittelun kypsyysmalli, integroitu ekosuunnittelumetodologia).

Tutkimukset ovat silti osoittaneet, että ekosuunnittelun eksplisiittinen sisällyttäminen yrityksen suunnitteluprosesseihin on pysynyt maltillisena (Dekoninck ja muut 2016, Jönbrink & Melin 2008).

Materiaalien ja yhdisteiden korvaaminen voidaan nähdä myös yhtenä suunnitteluratkaisuna, jolla vähennetään materiaalien saantiriskiä. Tällä hetkellä osa materiaaleista, seoksista ja komposiiteista on myrkyllisiä, kriittisiä, konfliktimateriaaleja tai haastavia kierrätysvaiheessa. Korvaamisen kohteena voi olla materiaali, tuote tai toiminto ja se mainitaan usein ratkaisuna raaka-aineisiin liittyviin haasteisiin ja esimerkiksi toimitusvarmuuteen. Korvaaminen voi ratkaista raaka-aineisiin liittyviä haasteita vain tiettyyn pisteeseen asti. Rajoja asettavat esimerkiksi aineiden ympäristövaikutukset, eri metallien välinen optimointi sekä tutkimuksen puute (EASAC 2016).

ESIMERKKI korvaamisesta: Se, valitaanko suunnittelussa primääri- vai uusioraaka-aineita, voi vaikuttaa tuotteen energia- ja hiilijalanjälkeen merkittävästi. Jos sähkölaite valmistettaisiin kierrätysmateriaaleista ja laitteen eliniän pidentäminen otettaisiin huomioon suunnittelussa (esim. käytetään kestävämpiä materiaaleja ja suunnitellaan laite korjattavaksi), raaka-ainetarve voisi olla huomattavasti nykytarvetta pienempi, mikä vähentäisi vastaavasti myös laitteen koko elinkaaren aikaisia ympäristövaikutuksia.

3.4.1 Älypuhelin

Raaka-aineet

Älypuhelinten tämänhetkiset suunnittelu- ja toiminnallisuustrendit painottavat erityismetallien käyttöä, mikä kasvattaa esimerkiksi indiumin, lantaanin, litiumin ja tantaalin kysyntää. Myös erityiskeramiikkaa ja karkaistua lasia käytetään enenevässä määrin. Uudempien älypuhelinsukupolvien ympäristövaikutukset ovat suurempia erityisesti niiden kasvavan laskentatehon ja suuremman koon vuoksi (Watson ja muut 2017). Jos älypuhelimet suunniteltaisiin purettaviksi ja kierrätettäviksi, ne voisivat olla arvokas uusioraaka-aineen lähde käyttöiän päättymisen jälkeen. Kun älypuhelimet sekoittuvat muihin SER-virtoihin, materiaalin talteenotosta tulee haastavampaa. Lisäksi joissain tapauksissa materiaalin kierrätyksen vähäinen taloudellinen kannattavuus ja raaka-aineiden edulliset hinnat eivät motivoi raaka-aineiden uudelleenkäyttöön tai säästämiseen. Vaikka puhelinvalmistajat ovat alkaneet käyttää enemmän uusioraaka-aineita tuotteissaan, älypuhelinten kierrätetty sisältö varsinkin jalomateriaalien osalta on yhä varsin matala.

Korjattavuus ja vanheneminen

Tällä hetkellä suurinta osaa älypuhelimista ei ole suunniteltu helposti korjattaviksi, eivätkä käyttäjät voi itse vaihtaa niiden akkuja. Osa valmistajista saattaa myös tarkoituksella valita muka kestävämmän suunnittelun korjattavuuden sijaan. Jopa tapauksissa, joissa korjaaminen on teknisesti mahdollista, laitteet eivät välttämättä toimi kunnolla, jos niissä käytetään muita kuin alkuperäisen laitevalmistajan (OEM) komponentteja. Muut kuin viralliset huoltoliikkeet eivät välttämättä edes saa OEM-komponentteja (Watson ja muut 2017).

Älypuhelimet saattavat vanheta hyvinkin nopeasti, oli se sitten tarkoituksenmukaista tai ei. Niin kutsuttu suunniteltu vanheneminen (Guiltinan 2009) voidaan määritellä fyysiseksi ja teknologiseksi vanhenemiseksi. Se koskee ongelmia kuten korjattavuuden puute, osien suunniteltu hajoaminen, esteettisen laadun väheneminen, suunnittelun vanheneminen ja yhteensopivuuden puute (esim. kun ohjelmistopäivitykset lakkaavat toimimasta) (Cenci ja muut 2021). Vaikka kaikki ongelmat ovat tärkeitä, yhteensopivuuden puute on erityisen huolestuttavaa älypuhelimissa ja muissa laitteissa, jotka ovat ohjelmistoista riippuvaisia ja yhteydessä internetiin.

Ohjelmiston vanheneminen tarkoittaa tilannetta, jossa laite pystyy teknisesti suorittamaan toiminnot, joihin se on suunniteltu, mutta sen valmistaja lopettaa tietoisesti laitteen tuen. Huipputason elektronisissa laitteissa ohjelmistot ovat niiden ydintoiminnallisuuksia, eivätkä laitteet voi toimia kunnolla tai turvallisesti, elleivät niiden ohjelmistot ole ajan tasalla. Tämä johtaa tuotteiden elinkaaren lyhenemiseen. Kuluttajat eivät myöskään yleensä pysty vaikuttamaan ohjelmistoihin.

Nopean, suunnitellun tai muun vanhenemisen riskin minimoinnista ovat vastuussa paitsi älypuhelinten tuottajat myös komponenttien ja ohjelmistojen tuottajat.

Läpinäkyvyys

Useat älypuhelinvalmistajat ovat ottaneet ympäristö- ja vastuullisuusperiaatteet mukaan suunnitteluprosesseihinsa. Maailman suurimpien älypuhelinyritysten Huawein, Applen, Samsungin, LG:n ja Sony Mobilen esimerkit osoittavat, että periaatteisiin voi sisältyä vaatimuksia kierrätysmateriaalin käytöstä, kiertotalouden huomioivasta suunnittelusta, paremmasta energiatehokkuudesta, resurssitehokkuudesta sekä raskasmetallien ja vaa-

rallisten aineiden käytön vähentämisestä. Yritykset eivät kuitenkaan useinkaan paljasta käyttämiensä vastuullisuuskriteerien yksityiskohtia. Yritykset voisivat kertoa läpinäkyvämmin, miten nämä kriteerit näkyvät valmiissa tuotteissa, kuinka laajasti niitä käytetään valmistajan tuotevalikoimassa ja miten niitä on kehitetty vuosien aikana.

Fairphone puolestaan on ottanut tehtäväkseen suunnitella älypuhelimen, jonka liiketoimintamallin ytimessä on ympäristösuunnittelu. Fairphonen markkinaosuus on yhä pieni, mutta se on näyttänyt esimerkkiä esimerkiksi läpinäkyvyydessä, tuotteen elinkaaren pidentämisessä, tuotantoketjun työoloissa ja kierrätettyjen materiaalien käytön lisäämisessä.

Modulaarisuus

Modulaarisen älypuhelimen käsite on herättänyt viime vuosina huomiota, mutta suuren mittakaavan massatuotantoon tällaiset eivät ole vielä päätyneet. Modulaariset älypuhelimet tarjoavat mahdollisuuden rikkoutuneiden komponenttien vaihtamiseen ja puhelimen ja sen ominaisuuksien päivitykseen tai laajentamiseen. Fairphone, PuzzlePhone (ei vielä markkinoilla) ja Googlen entiset modulaaripuhelinprojektit ARA ja ZTE (kumpikin keskeytetty) ovat esimerkkejä modulaarisista älypuhelinmalleista. Modulaarisen suunnittelun haasteet liittyvät esimerkiksi puhelimen koon ja siten tuotannon materiaalivaatimusten kasvuun. Tätä puolestaan pitäisi tasapainottaa pidemmällä elinkaarella.

Ellen MacArthur Foundationin kehittämä viihdeelektroniikan kiertotalouden strategiakehys esittää, että materiaalien talteenoton ja kustannussäästöjen tehokkuuden kannalta älypuhelinten ei välttämättä tarvitse olla täysin modulaarisia, mutta ne tulisi suunnitella ainakin osittain modulaarisiksi. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että painetut piirilevyt (PCB:t), näytöt, akut ja kuoret tulisi voida erottaa helposti ja nopeasti. Myös Fairphonen (2017) kierrätettävyystutkimus osoittaa, että kun kierrätyksen esivaiheessa tapahtuva osiin purkaminen on helppoa, voidaan ottaa talteen useampia materiaaleja pienemmillä ympäristövaikutuksilla. Tämä johtuu siitä, että eri moduulit voidaan joustavammin kierrättää eri reittejä pitkin.

3.4.2 Älytelevisio

Raaka-aineet

Vaikka älytelevisioiden raaka-aineet ovat suurilta osin samat kuin älypuhelimissa, tiettyjä raaka-aineita kuten lasia, muoveja, erilaisia näytöissä käytettyjä kaasuja ja esimerkiksi ceriumia käytetään paljon suurempia määriä. LCD-paneelien (sittemmin LED) markkinoille tulemisen jälkeen televisiot muuttuivat huomattavasti kevyemmiksi verrattuna CRT-teknologiaa käyttäneisiin vanhemman sukupolven televisioihin. Suunnittelussa painotetaan yhä ohuempia televisioita, mutta materiaalivaatimukset eivät enää pienene. Nykyään normaalina pidetty television koko on päinvastoin niin suuri, ettei sellaista olisi vuosikymmen tai kaksi sitten osattu kuvitellakaan. Lisäksi uudet näyttötekno-logiat, kaarevat tai rullattavat näytöt, HDR- ja 3D-kuvat ja muut teknologiset ominaisuudet vaativat entistä kehittyneempiä komponentteja, aivan kuten älypuhelimissakin.

Korjattavuus ja vanheneminen

Nykyisten älytelevisioiden elektroniset komponentit ovat erittäin kehittyneitä. Älytelevisiot ovat verkkoon liitettyjä laitteita. Niissä on älypuhelinten kaltaisia käyttöjärjestelmiä. Ne paitsi projisoivat kuvan näytölle myös prosessoivat ja parantavat vastaanotetun signaalin kuvaksi, ja siihen ne tarvitsevat laskentatehoa. Mitä monimutkaisempi laite, sitä vaikeampi se on korjata ja kierrättää.

Näyttövauriot ovat älytelevisioille tyypillisiä. Vanhemmat CRT-näytöt valmistettiin paksusta lasista, eikä niitä saanut kotitalouksissa helposti rikki. Nykyisten LED-paneelien pinnalla on vain ohut lasi- tai muovikerros. Näyttöjen alati kasvavan koon ja huomaamattomien alustojen vuoksi myös vahingoista johtuvat vauriot ovat todennäköisempiä. Rikkoutuneen televisiopaneelin vaihtaminen on teknisesti mahdollista, mutta se ei useinkaan ole taloudellisesti järkevää. Lisäksi älytelevisioiden suunnittelun tekninen kehitys on yhtä nopeaa kuin älypuhelimissa ja muissa elektronisissa laitteissa, mikä ei välttämättä motivoi kuluttajia vanhojen televisioiden korjaamiseen.

3.5 Hankinta, käyttö ja käyttöiän pidentäminen

Elektronisten laitteiden ostajia ovat yleensä joko kuluttajat tai organisaatioiden edustajat (yritykset tai julkinen sektori) ja tämä vaikuttaa hankintakriteereihin. Yleensä ostopäätöksen taustalla vaikuttava ajatusprosessi lähtee liikkeelle siitä, että ostaja tunnistaa tarpeen, luo vaihtoehtoja ja valitsee

sitten tietyn tuotteen ja brändin. Tähän ajatusprosessiin vaikuttavia tekijöitä on useita. Osa niistä liittyy tilanteeseen tai hankittavaan tuotteeseen, osa päätöksen tekevään henkilöön. Älypuhelimen ympäristövaikutukseen liittyviä ostopäätöstekijöitä on tutkittu vain vähän; suurin osa tutkimuksista keskittyy markkinointi- tai mainosstrategioihin (ks. esim. Martins ja muut 2019, Lee ja muut 2017).

Ostajat kertovat yhä useammin, että he haluavat elektronisen laitteen olevan vastuullisesti tuotettu sekä helppo purkaa, korjata ja kierrättää. Organisaatioiden hankintaosastolla ja varsinkin kuluttajilla on kuitenkin vähän tietoa luotettavista vastuullisuusstandardeista ja siitä, minkä kriteerien perusteella vastuullisia hankintapäätöksiä voi tehdä (Judl ja muut 2018). Organisaatioiden hankintaosaston ostopäätökseen voi pyrkiä vaikuttamaan esim. määriteltyjen kriteerien ja hankintalinjausten kautta tai vastuullisuuteen perustuvia menettelysääntöjä soveltamalla. Esimerkiksi EU:lla (European Commission 2021a), Yhdysvalloilla ja Japanilla (Ministry of the Environment Japan 2016) on vastuullisen hankinnan suuntaviivat tai rekisterit, joiden avulla vastuullisuutta voidaan sisällyttää hankintoihin järjestelmällisesti ja läpinäkyvästi. Tuorein esimerkki EU:sta on Alankomaiden ympäristöministeriön aloittama sopimus reilusta ja kiertotalouteen perustuvasta ICT:stä. Sopimuksen tavoitteena on luoda tuottajaverkosto, joka vastaa reilujen ja kiertotalouteen perustuvien kannettavien tietokoneiden ja älypuhelimien kysyntään. Tämä puolestaan auttaa ICT-tuottajia muuttamaan liiketoimintaansa ja vauhdittaa uusia innovaatioita. Tähän mennessä seitsemän EU-valtiota on allekirjoittanut sopimuksen.

On yhä tärkeämpää löytää tapoja, joilla voidaan vähentää uusien elektronisten laitteiden tarvetta, uudelleen käyttää olemassa olevia laitteita ja niiden toimivia osia sekä lisätä niitä käyttävien ihmisten määrää. Tämä voidaan tehdä esim. pidentämällä elektronisten laitteiden käyttöikää tai käyttämällä erilaisia jakamis- tai omistajuusmalleja. Elinkaarta voidaan pidentää suunnittelun kautta, korjausliikeverkostoilla, lainsäädännön korjausvaatimuksilla sekä korjauksen ja ohjelmistopäivitysten alemmalla verotuksella (Judl ja muut 2018).

3.5.1 Älypuhelin

Hankinta

Loppukäyttäjille myytävien älypuhelinten määrä on vuosina 2007–2021 kasvanut 12-kertaiseksi (vuonna 2007 myytiin 122 miljoonaa yksikköä, kun taas vuonna 2021 jo 1 535 miljoonaa yksikköä). Suurin kasvu tapahtui vuosien 2007 ja 2015 välillä (Statista 2021b). Shabrin ja muut (2017) määrittelevät seitsemän tekijää, jotka vaikuttavat älypuhelimen ostopäätöksiin: tuotemerkki, vaivattomuus, riippuvaisuus, hinta, sosiaalinen vaikutus, tuotteen ominaisuudet ja sosiaaliset tarpeet. Ostopäätös on vaikuttava jokapäiväisen käytöksen alue, joka voi vaikuttaa tuotejärjestelmän sosiaalisiin ja ympäristövaikutuksiin (Mao ja muut 2020). Ostopäätöksiä voidaan ohjata vastuullisemmalle pohjalle tuuppaamalla eli positiivisella vahvistamisella ja epäsuorilla ehdotuksilla, jotka vaikuttavat käytökseen ja päätöksentekoon (Thaler & Sunstein 2008).

Ostopäätöksen tueksi tarjolla on standardeja ja tuotemerkintöjä, jotka on kehitetty nimenomaan auttamaan kuluttajia vastuullisempien älypuhelinten ostamisessa. Kriteerit vaihtelevat ohjelmasta toiseen, mutta kattavat yleensä energiankäytön, vastuullisen materiaalien käytön, tuotteen käyttöiän pidentämisen, vaaralliset materiaalit, konfliktimineraalit ja yhteiskuntavastuun. Näiden standardien käyttö on kuitenkin ollut tähän asti varsin vähäistä, ja hankintaorganisaatioilta, kuluttajilta ja päätöksentekijöiltä kaivataan yhä parempaa tietoisuutta ja kattavaa sitoutumista.

- **TCO-sertifiointi** on riippumaton ICT-tuotteiden vastuullisuussertifiointi, joka koskee myös älypuhelimia, näyttöjä ja tietokoneita. TCO-sertifioinnissa käytetyt kriteerit kattavat ympäristö- ja yhteiskuntavastuun elinkaarinäkökulmasta. Kriteerien noudattaminen varmistetaan riippumattomasti. TCO-sertifiointi on ISO 14024:n mukainen 1. tyypin ekomerkintä. Tämä tarkoittaa sitä, että kriteeriä kehitetään tieteellisillä periaatteilla ja sen avoimessa kehitysprosessissa on mukana useita sidosryhmiä ja asiantuntijoita. Tällä hetkellä yhdelläkään puhelinmallilla ei ole tätä sertifiointia.
- **ECOLOGO-sertifiointi** UL (Underwriter Laboratories) on kehittänyt matkapuhelimille elinkaarelle perustuvan ympäristövastuullisuusstandardin. Useat Samsungin, Huawein, LG:n ja HTC:n puhelinmallit ovat täyttäneet standardin. Yhdysvaltojen EPEAT-rekisteri käyttää tätä standardia matkapuhelinten ympäristökriteereissään.
- **Blue Angel** (Blauer Engel) on Saksan liittovaltion ympäristömerkintä, joka koskee myös matkapuhelinten vaatimuksia. Vuonna 2017 kehitettiin ja julkaistiin uudet, yhteiskunnallista vastuullisuutta entistä enemmän painottavat vaatimukset.

Mikään matkapuhelinmalli ei kuitenkaan ole vielä saavuttanut uusien kriteerin mukaista sertifiointia.

Käyttövaihe ja käyttöiän pidentäminen

Raaka-aineiden näkökulmasta on tärkeää löytää tapoja älypuhelinten käyttöiän pidentämiseen. Matkapuhelinten käyttöikä laski 4,8 vuodesta 4,6 vuoteen (-3 %) vuosina 2000–2005 (Bakker ja muut 2014), mutta nykyaikaiset älypuhelimet harvoin kestävät tai pysyvät käytössä niin pitkään. Älypuhelinten globaaliksi keskimääräiseksi vaihtotahdiksi on arvioitu 21 kuukautta (Lu 2017). EU:n jätedirektiivi (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2008/98/EY [Directive 2008/98/EC], European Parliament 2008) sekä jätelaki (646/2011) määrittelevät jätehuollon perusteet, kierrätystavoitteet ja kierrätettyjen raaka-aineiden käytön ja määräävät, että tuotteiden on oltava kestäviä, korjattavia ja käytön jälkeen helposti kierrätettäviä.

Jos älypuhelimen käyttöikä on 21,6 kuukautta, muodostavat sen tuotanto, raaka-aineiden hankinta, valmistus ja kokoonpano 81 % tuotteen kasvihuonekaasupäästöistä (Rizos ja muut 2019). On syytä ottaa huomioon, että energiankulutus riippuu pitkälti älypuhelimen käyttöprofiilista, ja mm. Rizon ja muut (2019) ovat tarkastelleet älypuhelimen ”keskivertokäyttäjää”. Keskimääräisen käyttöiän pidentäminen vähentää älypuhelinten kasvihuonekaasupäästöjä, sillä laitteita täytyy valmistaa vähemmän ja siten raaka-aineitakin kuluu vähemmän. Rizos ja muut (2019) arvioivat, että EU:n älypuhelinten kokonaispäästöt ovat 70,2 miljoonaa hiilidioksiditonnia 21,6 kuukauden käyttöiällä, mutta vähenisivät 49,9 miljoonaan tonniin, jos käyttöikä olisi 33,6 kuukautta, ja jopa 39,7 miljoonaan tonniin, jos käyttöikä olisi 45,6 kuukautta. Analyysin aikakehys oli 10 vuotta, ja raportoidut säästöt vastaavat 364 000 älypuhelimen (33,6 kuukauden käyttöikä) ja 546 000 älypuhelimen (45,6 kuukauden käyttöikä) päästöjä.

Kuluttajia kiinnostavat kunnostetut älypuhelimet jatkuvasti enemmän (Mugge ja muut 2017, Judl ja muut 2018). Kunnostukseen liitetyt ympäristöhyödyt ja niiden tunteminen vaikuttavat positiivisesti kuluttajien kunnostettujen älypuhelinten ostoaikeisiin (Mugge ja muut 2017).

Kunnostettujen puhelinten markkinat kasvoivat uusien älypuhelinten markkinoita enemmän, 9,2 % vuonna 2019, ja olivat 206,5 miljoonaa laitetta. Markkina-arvon odotetaan nousevaan 55 miljardiin euroon (tai noin 350 miljoonaan laitteeseen) vuoteen 2024 mennessä (IDC 2021). Uusien laitteiden kokonaismarkkina vuonna 2019 oli 1,37 miljardia, ja kunnostettujen puhelinten markkinat vastaavat jo nyt 15 %:a uusien laitteiden markkinoista. Kunnostettujen älypuhelinten markkinat ovat kehittyvissä maissa olleet olemassa jo 2000-luvusta asti, ja myös siellä kunnostettujen puhelinten suosio kasvaa, sillä käytettyjen puhelinten markkinoilla on saatavilla suuria määriä täysin toimivia ja varsin uusia malleja (Rizos ja muut 2019). Samasta syystä myös useat eurooppalaiset yritykset ovat lähteneet kunnostettujen älypuhelinten markkinoille (ibid.). Kunnostettujen puhelinten markkinat ovat myös tulevaisuudessa merkittävä työnantaja. Rizos ja muut (2019) arvioivat, että jos kunnostettujen puhelinten markkinaosuus kasvaa 10 %:n lähtötilanteesta 30 %:iin, työpaikkojen määrä kasvaa 14 500:sta 29 000:een (20 %) tai 43 000:een (30 %).

Älypuhelinten vuokraukseen keskittyvät liiketoimintamallit voivat osaltaan pidentää varhaisten omaksujien ostamien parempien älypuhelinten käyttöikää. Leasingilla kuluttajat saavat käyttöönsä viimeisimmän laitteen, joka tietyn ajanjakson jälkeen (6 kuukautta, vuosi tai kaksi vuotta) myydään seuraavalle käyttäjälle. Jotkin toimintamallit menevät perinteistä leasing-vuokrausta pidemmälle. Esimerkiksi Fairphonen puhelin palveluna -mallissa älypuhelinyritys omistaa tuotteen, ja laite tai sen moduulit voidaan vuokrata useille perättäisille asiakkaille (Bakker ja muut 2014). Tällainen malli voi helpottaa materiaalien ja komponenttien takaisinottoa ja uudelleenkäyttöä tai kierrätystä, mikä parantaa resurssitehokkuutta (ibid.).

3.5.2 Älytelevisio

Käytön ja käyttöiän pidentäminen

Kun älytelevisio vanhenee tai menee rikki, se yleensä heitetään pois. Toimivat laitteet joko pysyvät kotitaloudessa tai annetaan tai myydään seuraavalle käyttäjälle. Arviot älytelevision käyttöiästä vaihtelevat viidestä kymmeneen vuoteen, kun CRT-televisioiden (perinteisten kuvaputkilaitteiden) käyttöikä oli 10–15 vuotta. Älypuhelimiin verrattuna älytelevisioiden suurin ilmastovaikutus syntyy käyttövaiheen energiankulutuksesta (69–86 % hiilijalanjäljestä). Tuotannon osuus hiilijalanjäljestä on vain 13–29 %. Tutkimusten mukaan yli 10 vuoden käyttöikä voisi silti olla ympäristön kannalta edullista. (Berwald ja muut 2020)

Vaikka suurimmat ilmastovaikutukset syntyvät käyttövaiheessa, on käyttöiän pituudella suuri

vaikutus, vaikka lyhytikäiset televisiot korvattaisiinkin energiatehokkaammilla vaihtoehdoilla (Prakash ja muut 2016). Piirilevyjen ja muiden ratkaisevien komponenttien kohdalla suurin ympäristöhyöty saavutetaan, kun ne suunnitellaan teknisesti kestäviksi. Ympäristönäkökulmasta television käyttöiän pitäisi olla pidempi, jos tilalle valitun komponentin ympäristövaikutus on suurempi (Berwald ja muut 2020).

Älytelevisioiden korjaamiseen liittyy useita tunnistettuja haasteita. Suositut ohuet näytöt ja takakannen kiinnityksessä käytetyt liimat tekevät laitteiden purkamisesta ilman erityistyökaluja vaikeaa. Lisäksi OLED-näyttöjä käyttävien älytelevisioiden elektroniikka on monimutkaisempaa ja integroidumpaa kuin vanhemmissa malleissa, mikä tekee niiden korjaamisesta haasteellista. OLED-näytön etu on se, että se kuluttaa vähemmän energiaa kuin LED-näytöt tai muut vanhemmat teknologiat (Berwald ja muut 2020).

Älytelevisiot ovat verkkoon liitettyjä, käyttöjärjestelmää käyttäviä laitteita, joten ohjelmistojen vanheneminen koskee niitä samalla lailla kuin älypuhelimiakin. Tuloliitäntöjen (HDMI, USB) ansiosta älytelevisiot ovat kuitenkin jossain määrin modulaarisia, ja myös vanhentunutta ohjelmistoa käyttävää televisiota voidaan käyttää älytelevisiona ulkoisten lisälaitteiden avulla. Tällöin itse televisio ei suoratoista verkkosisältöä, vaan sen hoitaa lisälaite (esim. Googlen Chromecast tai Apple TV) tai laitteeseen liitetty älypuhelin tai tietokone. Jos muiden kuin alkuperäisen laitevalmistajan omien ohjelmistojen käyttö aiheuttaa turvallisuusuhkia, niitä voidaan rajoittaa katkaisemalla älytelevision internetyhteys.

3.6 Kierrätys

Neitseellisten raaka-aineiden louhinta ja prosessointi merkittävä tekijä laitteiden kokonaishiilijalanjäljessä, varsinkin kullan, hopean, palladiumin ja muovin osalta (Rizos ja muut 2019). Yhden älypuhelimen valmistamista varten täytyy louhia noin 260 kertaa älypuhelimen painon verran malmia (ibid.). Uusioraaka-aineiden käyttö voi vähentää raaka-aineiden käytön ympäristövaikutuksia merkittävästi. Luvussa 2 käsiteltiin laajasti neitseellisten raaka-aineiden louhinnan ja käsittelyn ympäristövaikutuksia. Tässä luvussa keskitytään älypuhelinten ja älytelevisioiden kierrätyksen mahdollistajiin ja esteisiin, raaka-aineiden kierrätysasteeseen, kierrätyspotentiaaliin ja kierrätysprosesseihin.

Tehokas kierrätys pienentää primääriraaka-aineen kysyntää ja siten vähentää raaka-ainetuotannon ympäristövaikutuksia. On arvioitu, että kierrätettyjen metallien hiilijalanjäljet ovat huomattavasti (50–90 %) pienempiä kuin neitseellisillä raaka-aineilla (Wernet ja muut 2016, Rizos ja muut 2019). Esimerkiksi koboltin louhinta käyttää energiaa 140–2 100 megajoulea energiaa materiaalikiloa kohden, kun taas romumetallin energiankäytöksi on arvioitu vain 20–140 megajoulea kiloa kohden (Rizos ja muut 2019). Tulevaisuudessa primääriraaka-aineiden ympäristöjalanjäljen odotetaan kasvavan, kun käyttöön otetaan alempilaatuisia malmiesiintymiä. Lisäksi kierrätys säilyttää raaka-aineiden arvon, vähentää EU:n riippuvaisuutta tuontimateriaalista ja vähentää tiettyjen metallien tuotantoon liittyviä negatiivisia yhteiskunnallisia ja ympäristövaikutuksia. EU pyrkii lisäämään kierrätysastetta, tehostamaan kierrätystä ja lisäämään uusioraaka-aineiden käyttöä esim. SER-direktiivin kautta. (Judl ja muut 2020) Lisäksi ICT-valmistajat ja tuotemerkkien omistajat asettavat tavoitteita omien tuotteidensa kierrätykselle ja kierrätetylle sisällölle. Esimerkiksi Apple käyttää 99-prosenttisesti kierrätettyä volframia ja 98-prosenttisesti kierrätettyjä harvinaisia maametalleja uusimmissa iPhoneissaan, ja seitsemässä tuotteessa vähintään 20 % materiaalista on kierrätettyä (Apple 2021).

3.6.1 Kierrätyksen mahdollistajia ja haasteita

Yksi elektroniikan ja sähkölaitteiden kierrätyksen keskeisistä käsitteistä on kantajametalli. Kantajametallit ovat suhteellisen helposti kierrätettäviä, ja ne mahdollistavat vähemmässä määrin maakuoressa esiintyvien metallien kierrätyksen. Tämänhetkisiä elektronisia laitteita ei yleensä suunnitella kierrätyksen ja metallurgian näkökulmasta, mikä aiheuttaa kierrätysteknologioille haasteita. Lisäksi, jos laitteessa on useita eri metalleja, todennäköisesti osa niistä menetetään kierrätysprosessien aikana. Esimerkki kantajametallista on lyijy, jota tosin on jo osittain suunnittelun avulla poistettu puhelimista sen ympäristö- ja terveyshaittojen vuoksi. Kantajametalleilla on metallinkierrätyksen tehokkuuden kannalta ratkaiseva rooli,

ja siksi toisinaan saatetaankin suosia lyijyn käytön jatkamista ja tehostettua lyijyn kierrätysprosessien riskinhallintaa. (Judl ja muut 2020)

Suunnittelun painopisteen tulisi olla laitteiden uudelleenkäytössä tai uudelleenvalmistamisessa, ei niiden kierrätyksessä. Ekosuunnittelu on näitä näkökulmia edistävä lähestymistapa, jota käsitellään laajasti osassa 3.3. Ekosuunnittelun hyötyjä ja materiaalin säästämistä voidaan tehostaa arvoverkostojen yhteistyöllä. Kierrätysyrityksiltä voi saada arvokasta tietoa materiaalisuunnittelun ja modulaaristen tuoterakenteiden suunnittelun sekä kierrätettävyysnäkökulmien tueksi. Suunnittelijat eivät yleensä tunne kantajametallin käsitettä. Elinkaaren hallinnan tulisi olla kiinteä kiertotalouden osa, joka vähentää haitallisia ympäristö- ja talousvaikutuksia. Se tukee tuotteen koko elinkaaren hallintaa ja keskittää toimet niihin osiin, joilla vaikutukset ovat suurimpia (Judl ja muut 2020).

Yksi suunnittelustrategia voi olla vaikeasti kierrätettävien alkuaineiden ja materiaalien korvaaminen toisilla. Alkuaine voidaan korvata toisella alkuaineella tai materiaali, komponentti, tuote, järjestelmä toisella tai tuote palvelulla. Korvaaminen voidaan nähdä myös ratkaisuna, jolla ratkaistaan materiaalien kierrätyshaasteet vaihtamalla helpommin kierrätettäviin materiaaleihin. Korvaaminen tapahtuu materiaaleja kehittämällä, tuotesuunnittelulla ja uusilla liiketoimintamalleilla. Laajasti tulkittuna korvaaminen voi koskea myös myrkyllisten tai vaarallisten materiaalien ja konfliktimateriaalien vaihtamista toisiin sekä materiaalin käytön vähentämistä eli painon keventämistä.

Käytöstä poistettujen älypuhelinten ja muiden ICT-laitteiden koostumukset ovat heterogeenisiä, ja arvokkaita ja kriittisiä materiaaleja on useissa komponenteissa, esim. puhdasmetallikomponenteissa, painetuissa piirilevyissä, näytöissä ja eri seoksissa. Komponenttien materiaalisisällön paino ja arvo eivät yleensä korreloi, sillä ne metallit, joita on vain hyvin pieniä määriä, muodostavat usein kierrätettyjen älypuhelinten koko rahallisen arvon. (Judl ja muut 2020). Tarkemmat tiedot kierrätysmääristä ja SER-romun koostumuksesta voisivat luoda mahdollisuuksia uudelle, SER-romun uudelleenkäytölle tai kierrätykselle perustuvalle liiketoiminnalle.

Älypuhelinten kohdalla kierrätettyjen laitteiden pieni koko on myös haitta, sillä niissä on vähemmän arvokkaita raaka-aineita. Pienten ja monimutkaisten, kymmeniä metalleja, muoveja, lasia ja liimoja sisältävien laitteiden kierrätys on haastavaa. Erilaiset materiaalisisällöt vaativat erilaisia kierrätysprosesseja. Kuten on jo kuvattu, yhden älypuhelimen raaka-aineiden rahallinen arvo on noin 1 euro. Siksi kierrätettäviä laitteita tarvitaan valtavasti ja virran olisi oltava tasaista, jotta kierrätys olisi kannattavaa. Laitteiden kierrätettävän materiaalivirran voisi mahdollisesti yhdistää tuulivoimaloiden turbiinien materiaalivirtaan, kun niitä jossain vaiheessa alkaa tulla kierrätykseen. Raaka-aineiden markkinahintojen epävakaus aiheuttaa myös haasteen kierrätyksen kannattavuudelle ja sille, kuinka paljon tehokkaampaan kierrätysinfrastruktuuriin ollaan valmiita sijoittamaan. (Judl ja muut 2020)

Kierrätysprosessin aikaista hävikkiä ei voida välttää. ICT-laitteiden elinkaaren ja kierrätysprosessin hävikit voidaan kuitenkin minimoida suunnittelulla ja teknologiavalinnoilla ja -linjauksilla. Ratkaisevaa on ymmärtää, mitkä komponentit, seokset tai raaka-aineet voidaan käyttää uudelleen tai ottaa talteen laitteista sekä millaisia resursseja kierrätysprosesseihin on investoitava. Tämän tiedon tulisi ohjata kuluttajia heidän ostopäätöksissään ja organisaatioita kierrätyksen ja tuotteiden kehityksessä. Tieto voisi myös auttaa SER:n kierrätyksen ikuisuusongelmassa: kuluttajien tietoisuuden puutteessa. (Judl ja muut 2020)

Sekä älypuhelinten että älytelevisioiden kierrätyksen vastuullisuus on suuri haaste. Yksi keskeinen näkökulma on minimoida se SER, joka laittoman tai laillisen kaupan tuloksena tai muita epävirallisia reittejä pitkin päätyy maihin, joissa ei ole kestävää SER:n kierrätystä. Vaikka manuaaliseen työhön painottuvan kierrätyksen hyötysuhde voi olla parempi kehittyvissä maissa verrattuna kehittyneiden maiden automaattisen kierrätykseen, jätevirrat aiheuttavat saastumista ja terveyshaittoja (Judl ja muut 2018). Siksi olisi tärkeää varmistaa, että niissä maissa, joihin SER ja kunnostetut älypuhelimet viedään, on asianmukainen kierrätysinfrastruktuuri, käytössä on keräysjärjestelmiä ja työntekijöiden työolot ja palkat ovat kunnossa.

3.6.2 ICT-raaka-aineiden kierrätysasteet

Elektronisten laitteiden raaka-aineiden sataprosenttinen kierrätys ei ole tällä hetkellä ympäristön kannalta kannattavaa (Reuter & van Schaik 2012). SER-romun kierrätysaste on yleisesti varsin matala verrattuna suurempiin laitteisiin, kuten autoihin, tai rakennussektoriin. Kierrätysasteen kuitenkin odotetaan nousevan tulevaisuudessa (Judl ja muut 2020). Eurooppalaisissa politiikoissa ja lain-

säädäntökehyksissä, esimerkiksi SER-direktiivissä (2012), asetetaan SER-romun keräystavoitteet. Nämä tavoitteet ovat kuitenkin massapohjaisia eikä niissä huomioida alkuaineen tai yhdisteen kriittisyyttä tai taloudellista arvoa (Gurita ja muut 2018). Siksi kriittisiä ja arvometalleja menetetäänkin tarpeettomasti kierrätyksen aikana (ibid.). Harvinaisista maametalleista vain 1 % kierrätetään, ja 35 metallin kierrätysaste on alle 1 % (Judl ja muut 2020). Arvokkaiden ja kriittisten metallien kierrätyksellä voisi olla merkittäviä ympäristöhyötyjä (Bookhagen ja muut 2020). Tarvitaan siis uusia holistisia lähestymistapoja täydentämään nykyisiä massapohjaisia tai yksinomaan talousperustaisia lähestymistapoja, jotka tällä hetkellä määrittelevät, mitkä metallit ovat tärkeitä ja miten niiden tavoitteet asetetaan (Bookhagen ja muut 2020).

Älypuhelinten ja älytelevisioiden parempi sovittaminen kiertotalouden tavoitteisiin ja kehyksiin kuitenkin vaatii, että painopisteenä tulisi olla elektroniikkalaitteiden uudelleenkäyttö, ei SER-romun kierrätys. Esimerkiksi Suomessa 88 % SER-materiaalista kierrätetään, mutta vain alle 1 % siitä käytetään uudelleen (Judl ja muut 2020). Käyttöiän lopussa olevien älypuhelinten ja älytelevisioiden keskeisten raaka-aineiden kierrätysaste (RR) ja kierrätyksen syöttöaste (recycling input rate eli RIR) esitetään Taulukoissa 3 ja 16. EoL-RIR mittaa käyttöiän lopussa olevan romun määrää saatavilla olevasta metallin kokonaismäärästä.

Taulukko 16. Käyttöiän lopussa olevien (EoL) älypuhelinten ja älytelevisioiden keskeisten raaka-aineiden kierrätys, kierrätysasteet (RR) ja kierrätyksen syöttöasteet (RIR) EU:ssa (UNEP 2013, Eynard ja muut 2020, Latunussa ja muut 2020). Katso myös Taulukko 3.

Raaka-aineet	RR %	RIR %	Huomiot
Alumiini	60 – >90	12	Käyttöiän lopussa olevaa romualumiinia on useissa tuotteissa, esim. alumiinisissa juomatölkeissä tai ruokapakkauksissa, lentokoneiden, autojen ja muiden kulkuneuvojen komponenteissa, purettavista rakennuksista saatavissa esineissä, kuten ikkunapuitteissa ja käytöstä poistetuissa laitteissa. Jos EU olisi käsitellyt sisäisesti vuonna 2015 alueelta viedyn alumiinijätteen ja -romun, EoL-RIR olisi noussut 16 %:iin.
Arseeni	<1		Ei mainittavaa, dokumentoitua arseenin kierrätystä.
Grafiitti		3	Tällä hetkellä litiumioniakkujen kierrätykselle ei ole olemassa asteikkoa, joka ottaisi huomioon akun purkamisen sen sijaan, että grafiittia käytetään pyrometallurgisen prosessin lämmönlähteenä.
Hopea	30–50 (elektroniikka 100 %)	19	Merkittävä osuus hopeasta kierrätetään valmistusprosessin aikana. Vuonna 2014 kierrätettiin arviolta 5 200 tonnia vanhaa ja prosessoitua hopearomua. Vuosina 2010 ja 2011 kierrätysvirta oli kuitenkin ollut lähes puolet suurempi. Korujen, pöytähopeiden ja kolikoiden kierrätysaste on hyvin korkea, yleensä yli 90 %, sillä näiden ryhmien keräys ja kierrätys on helppoa. Korkealaatuisesta koruromusta tehdään yleensä seoksia paikan päällä sen sijaan, että se vietäisiin ensin puhdistettavaksi. Jalometallien hionnassa ja kiillotuksessa syntyvät hienot pölyhiukkaset sulatetaan yleensä epäpuhtaaksi hopeaksi, joka puhdistetaan elektrolyyttisesti. Kullalle käytettävät kierrätystekniikat ovat hopean kierrätykseen kannattamattomia, sillä hopearomun arvo on merkittävästi matalampi. Huonolaatuinen hopearomu palautetaan sulattoon prosessoitavaksi. Käyttöiän päättymisen jälkeinen kierrätyksen syöttöaste vaihtelee kuitenkin huomattavasti käyttökohteiden välillä: Ajoneuvot (sähkö- ja elektroniikkaosat): 0–5 %; Elektroniikka: 10–15 %; Teollisuuden käyttökohteet: 40–60 %; Muu: 40–60 %. Autojen ja elektroniikan sähkö- ja elektroniikkaosissa ja muissa sellaisissa käyttökohteissa, joissa hopean absorptio on pienempää, hopeaa menetetään keräys- ja paloittelu-vaiheissa sekä metallurgisessa talteenotossa. Huipputason metallurgialaitoksissa elektroniikassa olevan hopean talteenottoaste voi olla lähes 100 %, kunhan painetut piirilevyt (PCB) kerätään ja esikäsitellään asianmukaisesti. Elektroniikkaan verrattuna valokuvauksen, katalyyttien ja muiden teollisuuden käyttötapojen kierrätysaste on varsin matala.
Indium	~70		Indiumin uusiotuotannossa on käytetty pääasiassa loppuun käytettyjä ITO-suihkutuskohteita. Arvioiden mukaan yli 70 % kohteiden tällaisesta indiumista saadaan talteen. Tarkkaa tietoa romusta talteen otetun uusioindiumin määrästä ei ole saatavilla, mutta arvioiden mukaan määrä vastaa primäärituotannon indiumia. NREL arvioi, että puhdistetun uusioindiumin tarjonta oli 610 tonnia vuonna 2013 (Latunussa ja muut 2020). Aiemmin Indium Corporation arvioi, että puhdistettua indiumia tuotettiin 1 500 tonnia vuonna 2011, ja tämä luku sisältää 950 tonnia kierrätettyä indiumia.
Koboltti		22	Kovametallit, akut ja katalysaattorit voidaan kerätä ja kierrättää. Kobolttia sisältävää EoL-romua saadaan käytetyistä suihkumoottoreista, käytetyistä kovametallisista leikkuutyökaluista, loppuun käytetyistä ladattavista paristoista, teollisuus- tai kuluttajalaitteista poistetuista magneeteista sekä loppuun käytetyistä katalysaattoreista. EoL-tuotteiden kierrätys on EU:ssa tärkeä koboltin lähde.

Taulukko 16. Jatkuu.

Raaka-aineet	RR %	RIR %	Huomiot
Kulta	20–29		Huomattava määrä kultaa on käytössä koruissa, keskuspankkien varastoissa, yksityisissä sijoituksissa ja teollisuuden käytössä, mutta on epätodennäköistä, että kovinkaan suuri osa tästä kullasta palaa koskaan toimitusketjuun. Yleisesti koruja ja uskonnollisia esineitä pidetään joko pyhinä tai arvo-omaisuutena, joka siirtyy sukupolvelta seuraavalle. Keskuspankeille kulta on tärkeä reservivara, ja viime aikoina pankit ovat todennäköisemmin ostaneet kuin myyneet kultaa. Elektronisista laitteista kultaa ei juurikaan saada talteen, koska laitteita ei kerätä tehokkaasti niiden käyttöiän päättyessä. Suurin osa eli noin 90 % kierrätetystä kullasta tulee arvokkaista lähteistä eli koruista, kultaharkoista ja kolikoista. Näissä merkittävä osuus on kultaa, joka on sekoitettu yhteen tai useampaan muuhun metalliin. Teollisuuden lähdemateriaalien kuten sähkö- ja elektroniikkalaiteromun kierrätyksestä saatu kulta muodosti 10 % uusiotarjonnasta. Määrä on kasvussa, sillä vuonna 2004 luku oli noin 5 %. Painetuissa piirilevyissä (PCB) ja matkapuhelimissa olevan kullan pitoisuudeksi arvioidaan 200–350 g/t. Laitteiden tehokas kerääminen käyttöiän päättyessä on haastavaa, ja sen lisäksi kullan ja muiden arvometallien (palladiumin ja hopean) erottelu on teknisesti hyvin vaikeaa. Kultaa kierrätetään myös useista kaivostoiminnan ja metallurgisten operaatioiden välituotteista väli- ja sivutuotteista. Näitä ovat esimerkiksi kupari- ja lyijysulattojen anodiliejut ja metallipöly, monimutkaiset monimetalliset lyijy-, sinkki-, hopea- ja kultapitoisuudet, kultarikasteet sekä kullankaivuun muut kaivos- ja jalostustuotannon sivutuotteet kuten lietteet ja jäännökset. Käyttöiän lopussa olevien tuotteiden kierrätysaste ei koske korujen ja kolikoiden kierrätystä, sillä näillä tuotteilla ei tavallisesti ole EoL-hallintaa.
Kupari	37	17	Lähes kaikki kuparituotteet voidaan kierrättää useita kertoja ilman, että tuotteen ominaisuudet kärsivät. Uusiokupari on prosessoinnin tärkeä syöttölähde. Eurooppalainen louhittu kupari ei riitä vastaamaan kysyntään, joten EU on hyvin riippuvainen tuontirikasteiden jalostuksesta ja sulattamisesta sekä tuotantoromun ja EoL-tuotteiden kierrätyksestä. EU:ssa käsiteltiin 1, 959 kilotonnia uusiokuparia vuonna 2014.
Litium	0	0	Litiumin kierrätyspotentiaalista vain käytetyt litiumakut jäävät hyödyntämättä. Litiumioniakkujen kierrätys on monimutkainen ja kallis prosessi, jota haittaavat lukuisat käytetyt kemialliset koostumukset ja akkutyypit. Kierrätykseen on viime vuosina kiinnitetty paljon huomiota, sillä litiumioniakkujen merkitys kasvaa jatkuvasti, varsinkin nopeasti kasvavalla sähköautosektorilla. Nykyään litium on teknisesti mahdollista ottaa talteen akuista, mutta vuoteen 2017 asti teollisen mittakaavan kierrätystä ei pidetty kustannuksiltaan järkevänä primaarilähteisiin verrattuna. Siksi litiumioniakkuja kierrättävissä laitoksissa on keskitytty muiden, litiumia arvokkaampien metallien talteenottoon. Litiumioniakkujen kierrätys voi potentiaalisesti tuoda EU:lle jatkuvan ja vakaan uusiolitiumin lähteen, jos esimerkiksi litiumin korkeampi hinta tai muut tekijät tulevaisuudessa tekevät kierrätyksestä taloudellisesti houkuttelevaa.
Lyijy	80		Lyijyn kierrätysaste on yleisesti käytettyjen materiaalien korkeimpia. Puhdistettua lyijyä saadaan enemmän kierrätyksestä kuin kaivoksista. Vuosien 2012–2016 keskimääräinen uusiolyijyn tuotanto oli 6 300 kilotonnia vuodessa, mikä vastaa 57 %:a metallin kokonaistuotosta. EU:n jalostetun uusiolyijyn tuotanto kasvoi vuosien 2012 ja 2016 välillä 3 %. Keskimääräinen tuotos oli noin 1 146 kilotonnia vuodessa, mikä vastaa 80 %:a EU:n jalostetun lyijyn kokonaistuotannosta. Suurin osa uusiolyijystä tulee lyijyakuista, lyijyputkista, levyistä ja kaapelivaipoista. Rakennusalalta saatava romulyijy on yleensä varsin puhdasta, ja se voidaan sulattaa uudelleen yksinkertaisemmalla prosessilla. Jonkinlaisia puhdistusprosesseja voidaan silti tarvita. Lyijyakut ovat ainoita akkujärjestelmiä, joissa kierrätys on lähes kattavaa. EU:ssa lyijyakkujen kierrätystehokkuus vuonna 2017 oli suurimmassa osassa maista yli 75 %, ja autoteollisuudesta kerätyistä lyijyakuista 99 % kierrätettiin vuosina 2010–2012. Yli 95 % rakennusteollisuuden kattoihin käyttämistä lyijylevyistä kerättiin ja kierrätettiin. Myös putkiromu, liete, kuona ja pöly kierrätettiin. Lyijyn käyttöä on vähennetty aktiivisesti, sillä se on ihmisten terveydelle haitallista, mutta se on silti tärkeä kiertotalouden mahdollistaja: lyijy voi toimia lukuisten teknologia-alkuaineiden kantajana. Sulatetun lyijyn ominaisuudet ovat ainutlaatuisia, ja se voi olla useiden kriittisten raaka-aineiden tehokas nestemäinen kantaja (esim. In, Bi, Cd ja Te). (Blanpain ja muut 2019)
Magnesium		12–13	EU-tasolla magnesiumin kierrätyskapasiteetti on noin 75 000 tonnia vuodessa (pääasiassa uutta romua).

Taulukko 16. Jatkuu.

Raaka-aineet	RR %	RIR %	Huomiot
Mangaani	>50	9	
Nikkeli	45	34	Nikkelin laatu ei kärsi kierrätyksestä, ja se soveltuu myös uusioraaka-aineena useaan käyttöön. Nykyään uusio- tai romunikkelillä korvataan suuria tonnimääriä vastakaivettua malmia.
Pii		0	Suurin osa piimetallista käytetään dispersiossa, joten sen talteenotto ei ole mahdollista. Elektroniikkateollisuuden käyttämä piimetalli on korkealaatuisempaa kuin muissa käytöissä. Suurin osa elektronisten sovellusten kideharkko- ja kiekkotuotannon aikana syntyvästä piiromusta voidaan sen vuoksi käyttää aurinkopaneeliteollisuudessa. Pii-alumiiniseosten piimetallille ei ole toimivaa kierrätystapaa. Metallurgista piitä talous- ja ympäristösyistä ostavalla teollisuudella on käytössään kierrätysvirtoja sekä erillisiä tai erikoistuneita prosesseja mahdollisten sivuvirtojen hyödyntämiseen. Kuitenkin metallurgisen piin käyttäjät myyvät vain hyvin vähän materiaalia takaisin markkinoille. Vaikka piimetallille on ollut toimivia kierrätyslaitoksia, piimetallin käyttöiän päättymisen jälkeistä kierrätyksen syöttöastetta ei ole voitu laskea tarkasti. Arvioidaan, että kierrätyksen syöttöaste on edelleen matala.
Tantaali		<1	Tantaalin kierrätysaste vaihtelee materiaalityypin ja toimitusketjun vaiheen mukaan. Prosessoritasolla yrityksen kannattaa saavuttaa mahdollisimman suuri hyötysuhde. Tantaalia voidaan ottaa talteen romusta, jätteenpolton pohjatuhkasta, metalliseoksista, pyrometallurgisesta kuonasta ja tinakuonasta. Yleensä tantaalia saadaan kuonasta tai romusta liuottamalla romua korkeassa lämpötilassa rikkihappoon, jolloin lopputuloksena on erittäin puhdasta tantaalia ja niobiumia. Tantaalia sisältävien käytettyjen esineiden kierrätystä on, mutta pääasiassa kuluttajaa edeltävässä vaiheessa. Kierrätettävät esineet tulevat siis tuotantoketjun alkupäästä, eivät loppukäyttäjiltä. Prosessoriromu ja muut uusioraaka-aineet ovat tärkeä osa tantaalin tarjontaa. Valmistusvaiheessa, esimerkiksi kondensaattoreissa, syntyvä romu palautetaan prosessoreihin. Tämän kierrätysmateriaalin tärkein lähde on elektroniikkateollisuus (kondensaattorit, suihkutuskohteet jne.). Eri lähteiden arvioiden mukaan noin 30 % vuotuisesta uuden tantaalin kysynnästä täytetään kierrätysmateriaalilla, eikä luku ole juuri muuttunut muutamaan vuosikymmeneen. EU:ssa tantaalia käsittelevät useat kierrätysyritykset ja käsittelijät. Tantaalin talteenoton keskeisiä toimijoita löytyy Saksasta, Virosta, Ranskasta (kaoliinin louhinta) ja Espanjasta.
Tina	40–60	~30	Käyttöiän päättymisen jälkeinen kierrätysaste riippuu käyttökohteesta. Ruoka- ja juomatölkkien tinapinnoitettujen ohutlevyjen kierrätysaste on korkein, ja seuraavana tulevat elektroniikan juotteet. Tinan käyttöiän päättymisen jälkeinen kierrätyksen syöttöaste, sekä puhdistetut että puhdistamattomat muodot mukaan lukien, oli 30,7 % vuonna 2016, kun vuonna 2015 se oli 31,4 %. Uudelleenpuhdistettu tina muodosti luvuista noin 16 %.
Harvinaiset maametallit (REE)		<1	Käyttöiän päättymisen jälkeinen kierrätysaste on edelleen hyvin matala, varsinkin Euroopassa. Syitä ovat tehokkaiden keräysjärjestelmien puute sekä REE-kierrätyskapasiteetin rakentamista estävät kustannukset. Loistelamppujen kierrätyksen ansiosta europiumin, yttriumin ja terbiumin kierrätyksen syöttöaste on korkeampi. Kierrätys on usein vaikeaa, sillä harvinaisia maametalleja käytetään monimutkaisten laitteiden pienissä komponenteissa tai monimutkaisten materiaalien osana. Vaaditut kierrätysprosessit ovat energiaintensiivisiä ja monimutkaisia. Tästä huolimatta seosten valmistuksen aikana syntyvä uusi romu on tärkeä uusiolähde, pääasiassa suljetussa kierrossa (30 % magneettiseoksista päätyy romuksi valmistuksen aikana). Tämä pätee moniin metalleihin.
Fosfaattikivi	24–76	17	Käyttöiän poistumisen jälkeisen kierrätyksen syöttöasteen tulisi vastata sitä prosenttiosuutta, jolla biogeenisten jätevirtojen kierrätys korvaa mineraalifosfaattilannoitteiden (eli primääriraaka-aineen) käytön. Vuonna 2015 kierrätysaste oli viljantuotannossa 70 %, karjataloudessa 24 %, ruuantuotannossa 52 % ja fosforin muussa kuin ruokaan liittyvässä käytössä noin 76 %. Saatavilla ei kuitenkaan ole käyttökelpoista tietoa lannan ja muiden orgaanisten fosforimuotojen tehokkaasta uudelleenkäytöstä, joka korvaa lannoitteen tai muiden fosfaattikivestä johdettujen kemikaalien käytön. Siksi on tarve luoda asianmukaista tietoa ja määritellä kierrätysasteelle indikaattoreita, jotka ovat yhdenmukaisia muiden linjausten kanssa.

3.6.3 Älypuhelin

Kuluttajien käytöstä poistamien matkapuhelimien kerääminen on jatkuva ongelma (Reck & Graedel 2012), ja siksi tarvitaankin esimerkiksi erilaisia takaisinottojärjestelmiä. Matkapuhelimet jäävät usein käyttäjien laatikoihin makaamaan, ja matkapuhelinten kierrätysaste Euroopassa on 12–15 % (Rizos ja muut 2019). Kuten osassa 3.1 esitettiin, laitteessa on pieni määrä metallia, mutta kun kaikki valmistetut laitteet otetaan huomioon, volyymi vastaa hyvin suurta määrää raaka-aineita ja suurta laitemäärää. Bookhagen ja muut (2020) tarkastelivat 53:a älypuhelimissa käytettyä metallialkuainetta suhteessa metallien hintoihin, metallintuotantoon ja louhittujen esiintymien metallipitoisuuteen. Tutkimus ei koskenut akkuja. Tutkimuksen mukaan älypuhelimen raaka-aineiden kokonaisarvo on 0,81 euroa. Markkinahinta voi kuitenkin vaihdella, sillä kaikkien raaka-aineiden hinnat vaihtelevat. Hopeapitoisuus on matala (16,83 mg/laite), mutta sen osuus kaikkien mitattujen metallien kokonaisarvosta on silti suurin, noin 72 %. Seuraavana tulee palladium (10 %). Noin 82 % hopean, kuparin, palladiumin ja platinan kokonaisarvosta voidaan kierrättää nykyisillä peruskierrätysmenetelmillä. Nämä metallit muodostavat vain 6 % laitteen painosta.

Älypuhelinten metallisisällöstä saa paremman kokonaiskuvan, kun otetaan huomioon, että EU:n kotitalouksissa on noin 700 miljoonaa horrostavaa matkapuhelinta, joissa on kultaa, hopeaa, kuparia, palladiumia, kobolttia ja litiumia yhteensä 14 920 tonnia, joiden kokonaisarvo on yli miljardi euroa (Rizos ja muut 2019). Globaalilla tasolla vuosina 2012–2017 myytyjen 7,42 miljardin älypuhelimen puhdas metalliarvo on marraskuun 2019 hinnoilla 7,6 miljardia euroa, josta kullan osuus on 72 % (Bookhagen ja muut 2020). Metallisisällön arvo on siis vahva argumentti älypuhelinten kierrätyksen puolesta, vaikka kaikkea tuosta arvosta ei voidakaan järkevästi ottaa talteen. Älypuhelinten kulta-, platina-, palladium- ja kuparipitoisuus on myös paljon suurempi kuin primaariesiintymien pitoisuus (Bookhagen ja muut 2020).

Nykyinen kierrätysteknologia keskittyy taloudelliseen kannattavuuteen, ei kierrätysasteeseen tai kriittisiin metalleihin. Joidenkin kriittisten metallien (esim. Ga, Ge ja Ta) raaka-ainesisältö ja rahallinen arvo yhtä älypuhelinta kohden on suhteellisen pieni, mutta niiden määrä muodostaa silti 20–25 % näiden metallien vuotuisesta raaka-ainetuotannosta, kun otetaan huomioon vuosien 2012 ja 2017 välinen matkapuhelinten kokonaistuotanto. Näiden kriittisten metallien kierrätys voisi muodostaa merkittävän osan globaalista tuotannosta ja vähentää hintojen vaihtelua. (Bookhagen ja muut 2020)

Fairphonen älypuhelinten raaka-ainesisältö ja niiden kierrätyspotentiaali ovat julkista tietoa (Proske ja muut 2020). Vaikutus on arvioitu joidenkin keskeisten metallien osalta (esim. kulta, kupari, tina, volframi, litium, koboltti ja neodyymi).

Taulukko 17. Kierrätetty materiaali älypuhelimissa (Proske ja muut 2020).

Alkuaine tai materiaali	Paino	Vaikuttavat komponentit	Uusioraaka-aineen arvioitu hyöty	Kierrätys-prosessi	Uusioraaka-aineen markkina
Kulta	0,143 g	Akku, PCB:t	GWP kasvaa, laskua muissa luokissa	Vakiintunut	Vakiintunut, 33 % tuotannosta kierrätetään
Kupari	8,145 g	PCB:t	GWP laskee	Vakiintunut	Vakiintunut, 37 % tuotannosta kierrätetään
Tina	2,45 g	Juotepasta	GWP laskee	Vakiintunut	Vakiintunut, 31 % tuotannosta kierrätetään
Volframi	0,013 g	Värinämoottori	-	Vakiintunut	Vakiintunut, 35 % tuotannosta kierrätetään
Litium	5,2 g	Akku	-	Kierrätys ei vielä kustannustehokasta	Uusiolitiumille ei markkinoita
Koboltti	11,24 g	Akku	-	Vakiintunut	Vakiintunut, 35 % tuotannosta kierrätetään
Neodymium	0,17 g	Värinämoottori (magneetti)	-	Ei teollisen mittakaavan kierrätys-menetelmiä, kierrätysaste alle 1 %	Markkina on pieni ja alikehittynyt

Jotta kierrätyspäätöksiä, niiden ympäristövaikutuksia ja tietyille metalleille asetettuja kierrätystavoitteita voidaan arvioida, on tärkeää ymmärtää kierrätysprosessi kokonaisuudessaan. Sopiva kierrätysprosessi määritellään yleensä tapauskohtaisesti. Mitä monimutkaisempi tuote ja mitä suurempi materiaalien kirjo, sitä enemmän resursseja kierrätysprosessissa tarvitaan ja sitä enemmän metallia kierrätyksen aikana menetetään. (Judl ja muut 2020). ICT-laitteiden kierrätysprosessi voidaan jakaa lajitteluun ja keräämiseen, mekaaniseen esikäsittelyyn ja erotteluun sekä metallurgiseen puhdistamiseen.

Lajittelu ja keräys

Kun älypuhelimen käyttöikä päättyy, tavoitteena on, että laitteet kerätään kierrätykseen tai uudelleenkäyttöön. Kunnat ja kaupalliset toimijat ovat vastuussa ICT-laitteiden keräyksen järjestämisestä (Judl ja muut 2020). Myös kuluttajien lajittelulla on merkittävä vaikutus kierrätyksen ja talteenoton tehokkuudelle. Älypuhelinten keräyksen parhaita käytäntöjä ovat useiden helposti saavutettavien keräyspaikkojen toteuttaminen esim. kierrätysasemille, laitteiden myyntipisteisiin ja muihin strategisiin sijainteihin (Rizos ja muut 2019). Näin vältytään ylimääräisiltä kuljetusvaatimuksilta. Kuluttajien kannustimet älypuhelinten kierrättämiseen ovat kuitenkin rajallisia, ja SER:n keräysaste on edelleen matala (ibid.). Parhaillaan kehitetään uusia käytäntöjä, joilla kuluttajia kannustetaan palauttamaan käytöstä poistetut älypuhelimet SER-direktiivin mukaisesti. Näitä käytäntöjä ovat alennus uudesta laitteesta, kun vanha annetaan samalla kierrätykseen, ja parempi tietoisuus älypuhelimen asianmukaisesta hävittämisestä (Rizos ja muut 2019).

Lisäksi useilla lain soveltamisalueilla ja useissa maissa laajennettu tuottajavastuu (EPR) koskee pakollisena myös älypuhelinten tuottajia. Laajennettu tuottajavastuu vaatii tuottajaa varmistamaan, että jätteet kierrätetään asianmukaisesti eivätkä ne päädy kaatopaikoille. Osa jätevirrasta päätyy viennin kautta tai epävirallisia reittejä kautta maihin, joissa ei ole asianmukaista SER:n kierrätystä. Nämä jätevirrat aiheuttavat saastumista sekä terveyshaittoja epävirallisella SER-sektorilla työskenteleville. (Judl ja muut 2018)

Mekaaninen esikäsittely ja erottelu

Esikäsittelyn ja erottelun tavoite on luoda laadukkaita jakeita puhdistukseen. Erotteluprosessin tehokkuuteen vaikuttavat muun muassa materiaalin viskositeetti, partikkelien muoto ja varaus sekä pH.

Mekaaninen esikäsittely ja erottelu lähtevät liikkeelle älypuhelimen akun poistamisesta, minkä jälkeen raaka-aineet on helpompi ottaa talteen. Akut ja älypuhelin lähetetään loppukäsittelylaitoksiin, joissa materiaalit kierrätetään ja otetaan talteen. Kierrätysvaiheessa laitteet yleensä murskataan ja jauhetaan. Jauhetut materiaalit, pöly mukaan lukien, erotellaan erilaisilla teknologioilla jatkokäsittelyä varten. Älypuhelinten kierrätykseen on käytössä prosesseja, mutta Rizos ja muut (2019) ja Judl ja muut (2020) kuitenkin huomauttavat, että useat esteet rajoittavat näiden lähestymistapojen lisäkehitystä (katso osat 3.5.3–3.5.5).

Metallurginen prosessointi ja arvokkaiden raaka-aineiden talteenotto

Mekaanisesta esikäsittelystä ja erottelusta saatavat puhdistetut jakeet syötetään metallurgiseen prosessointiin. Puhtaat metallijakeet voidaan sulattaa ja myydä uudelleen. Muut jakeet lähetetään pyro-, hydro- tai sähkömetallurgiseen käsittelyyn tai näiden yhdistelmään (Judl ja muut 2020). Nykyisten kierrätyskäytäntöjen tavoitteena on saada älypuhelimista talteen kulta, palladium, hopea ja tina sekä akusta koboltti. Galliumia sisältävien mikropiirien poistamisessa olisi kuitenkin huomattavaa potentiaalia. Gallium voitaisiin ottaa talteen tai käyttää mikropiirit uudelleen. Myös akkujen harvinaiset maametallit voitaisiin ottaa talteen. (Chancerel ja muut 2015)

3.6.4 Älytelevisio

Televisionäytöt ja -monitorit muodostivat vuonna 2019 globaalisti 6,7 miljoonaa tonnia SER:a. Määrä on laskenut yhden prosentin vuodesta 2014. Tämä johtuu suurelta osin siitä, että kevyet paneelinäytöt ovat korvanneet painavat CRT-näytöt SER:ssa. Siksi SER:n kokonaismassa pienenee, vaikka laitteiden kappalemäärä kasvaa edelleen (Forti ja muut 2020).

Älytelevisioiden keräys- ja kierrätysprosessi seuraa samoja polkuja kuin älypuhelintenkin. Myös kierrätettävä materiaalisisältö vastaa älypuhelimia, vaikka suuremman koon vuoksi tiettyjä raaka-aineita onkin enemmän. LCD-näytöissä keskeisiä kierrätettäviä raaka-aineita ovat indiumtinaoksidi (ITO), perusmetallit (alumiini), jalometallit (kupari, kulta, hopea jne.), lasi, kaapelien kupari, kaiuttimien metallit ja muovit (ABS, levyt) (Akcil ja muut 2019). Panasonic (2019) ilmoittaa, että se on saavuttanut televisioissaan 99 %:n resurssikierrätysasteen, joka koostuu 10-prosenttisesti lämpökierrätyksestä ja 89-prosenttisesti materiaalin kierrätyksestä. Materiaalin kierrätys tarkoittaa osien tai raaka-aineiden käyttöä uusiin tuotteisiin, kun taas lämpökierrätys tarkoittaa hävitettävien osien poltosta syntyvän lämmön käyttöä energiana (= jätteen hyödyntämisen energiana).

3.6.5 Älypuhelinten kierrätyksen mahdollistajia ja haasteita

Älypuhelinten kierrätykseen pätevät samat periaatteet kuin muuhunkin elektroniikkaan (ks. 3.6.1). Älypuhelinten kierrätyksen vastuullisuus on suuri haaste, jota onkin jo käsitelty. Keskeistä on minimoida se SER, joka laittoman tai laillisen kaupan tuloksena tai muita epävirallisia reittejä pitkin päätyy maihin, joissa ei ole asianmukaista SER:n kierrätystä.

3.7 Haastattelut

Tutkimukseen kuului puolijäsenneltyjä haastatteluja, joiden avulla arvioitiin älylaitteiden myyntiprosessien, ostopäätösten, kuluttajien tietoisuuden ja vaatimusten sekä organisaatioiden hankintakäytäntöjen eri näkökulmia. Haastattelujen kysymykset ovat liitteessä 1. Haastattelut lisäsivät tutkimuksen käytännön relevanssia ja auttoivat tunnistamaan tärkeimmät raaka-aineisiin liittyvät haasteet ja ratkaisut. Tutkimuksessa haastateltiin kuluttaja- ja organisaatiomyyntiin osallistuvia sidosryhmiä. Näin saatiin tietoa suomalaisten älylaitteiden hankintapäätöksiin vaikuttavista tekijöistä, näihin liittyvistä raaka-aine- ja vastuullisuusasioista, kiertotaloutta, uudelleenkäyttöä ja käyttöiän pidentämistä estävistä haasteista sekä alan yleisistä trendeistä.

Haastatteluja tehtiin yhteensä kuusi, ja haastateltavat valittiin edustamaan sekä kuluttaja- että organisaatiomyyntiä ja uusien ja kunnostettujen laitteiden myyntiä. Haastateltavat edustivat pääasiassa älypuhelinsektoria, mutta osittain myös älytelevisioita. Kyselyssä käsiteltiin muun muassa seuraavia aiheita: ostopäätökseen vaikuttavat tekijät (esim. tekniset kysymykset, vastuullisuus- ja ympäristöseikat, käytetyt raaka-aineet, kierrätettävyys, korjattavuus), elinkaarien tyypillinen pituus, elinkaaren pidentämisen keskeisimmät haasteet,

sektorin tulevat vastuullisuustrendit sekä raaka-aineiden käyttöön liittyvät haasteet. Organisaatiomyynnissä mukana oleville toimijoille esitettiin hankintaohjeisiin ja työpuhelimen elinkaaren pidentämiseen liittyviä kysymyksiä. Lista haastattelukysymyksistä löytyy liitteestä 1.

Hankintapäätökseen vaikuttavia tekijöitä

Tärkeimmät älypuhelimen tai älytelevision hankintapäätökseen vaikuttavat tekijät ovat suorituskyky, suunnittelu, tuotemerkki ja hinta. Varsinkin älypuhelimissa ostajat pitävät tärkeinä teknistä suorituskykyä, esimerkiksi nopeaa internetyhteyttä ja kameratoimintoja. Myös tuotemerkki ja käyttöjärjestelmä ovat tyypillisiä tekijöitä. Vastuullisuus tai raaka-aineisiin liittyvät tekijät kiinnostivat ostajia harvoin eikä niitä juuri mainittu ostopäätökseen vaikuttavina tekijöinä. Sosiaalinen paine uuden huippumallin ostamiseen kuluttajakontekstissa mainittiin usein, ja kävi ilmi, että ostamiseen liittyy varsinkin nuoremmilla tiettyä yhteiskunnallista statusta. Kuluttaja-asiakkaista löytyy erilaisia asiakasryhmiä, esimerkiksi osa asiakkaista nimettiin teknisiksi edelläkävijöiksi, jotka vaativat uusia, teknisestä kehittyneitä puhelimia nopealla tahdilla, kun taas osa asiakkaista ei ollut niin kiinnostunut nopeasta kierrosta. Organisaatioasiakkailla uusiutumisen kierto perustuu organisaation yleisiin ohjeisiin, eikä se ole niin riippuvainen henkilökohtaisista mieltymyksistä.

Vaikka useat yhteiskunnalliset toimijat (media, suuri yleisö, valmistajat) keskustelevat vastuullisuuskysymyksistä jatkuvasti enemmän, paljastivat haastattelut, että kuluttajien ja myös yritysten todelliset toimet ovat yhä riittämättömiä. Kuluttajat kysyivät harvoin puhelinvalmistajien tai raaka-ainetuottajien vastuullisuudesta, vaikka pieni osa kuluttajista olikin tietoisempi ja kiinnostunut esim. konfliktimineraaleista, hiilijalanjäljestä ja muista kestävyyskysymyksistä. Toisaalta organisaatioasiakkaat hallitsivat toimittajaverkostojaan ja niihin liittyviä vastuullisuuskysymyksiä järjestelmällisemmin. Laitteen elinkaaren pituutta ja korjattavuutta painotetaan asiakkaiden osalta kuitenkin entistä enemmän ja laitemyyjiltä kysytään kysymyksiä, jotka liittyivät elinkaaren pituuteen 4G/5G-siirtymävaiheessa, käyttöjärjestelmän tuen jatkuvuuteen, akun odotettuun kestoon sekä korjattavuuteen. Kiinnostus käytettyjen ja kunnostettujen puhelinten kohtaan vaikutti olevan kasvussa varsinkin kuluttajapuolella. Organisaatioasiakkailla käytetyt puhelimet eivät ole herättäneet kiinnostusta, etenkin tiukempien turvallisuusvaatimusten vuoksi. Organisaatio-ostajat myös hankkivat suuria määriä puhelimia kerrallaan, eikä samantyyppisten kunnostettujen puhelimien saatavuutta voida aina taata.

Sekä kuluttaja- että organisaatio-ostajat olivat kiinnostuneita takaisinottojärjestelmistä, joita useat yritykset ovat ottaneet käyttöön tai kehittävät parhaillaan. Näissä järjestelmissä painotetaan usein taloudellisia tekijöitä vastuullisuuskysymysten sijaan, mutta ne mainittiin silti lähestymistapoina, jotka lisäävät uudelleenkäyttöä ja kierrätystä tehokkaasti. Myös puhelin palveluna -mallien suosio on kasvanut varsinkin organisaatiopuolella. Osa vähittäismyyjistä tarjoaa palvelua myös kuluttajille.

Hankintatilanteessa useat ostajat luottavat myyjiltä saatavaan tietoon. Suorituskyky, tuotemerkki ja hinta ovat ensisijaisia, joten myyjät joutuvat harvoin tekemisiin raaka-aine- tai vastuullisuuskysymysten kanssa. Osa vähittäismyyjistä ilmoitti, että elektroniikan kestävyysteemoista on saatavilla yleistä koulutusmateriaalia (raaka-aineisiin liittyvistä aiheista vähemmän), mutta niiden merkitys myynnissä on toistaiseksi vähäistä. Toisaalta useat toimijat kertoivat uskovansa, että myös myyjät tulevat olemaan aktiivisempia tietoisuuden kasvattamisessa.

Ostopäätökseen vaikuttavat tekijät:
- Tuotemerkki, suorituskyky, hinta
- Ohjelmistopäivitysten saatavuus
- Elinkaaren pituus (akku, komponentit, koko laite)
- Korjattavuus
- Takaisinottojärjestelmä ja taloudelliset kannustimet
- Puhelin palveluna -malli (organisaatioasiakkaat)

Elinkaaren pidentämiseen liittyviä haasteita ja ehdotuksia

Yksi keskeisistä luonnonvarojen käyttöä rasittavista tekijöistä on laitteiden lyhyet elinkaaret. Älypuhelinten elinkaaren pidentämisen haasteita nimettiin useita. Yleisesti älypuhelimen ensimmäisen käytön pituuden arvioitiin olevan 2–3 vuotta. Jos älypuhelin siirtyi toiselle käyttäjälle, tämän toisen käytön pituuden arvioitiin olevan 1–2 vuotta. Tärkeimmät syyt lyhyisiin elinkaariin liittyivät pääasiassa kulutustapoihin, laitesuunnitteluun ja ohjauskeinoihin tai niiden vähyyteen, tietoisuuden puutteeseen, laitteen huolimattomaan käsittelyyn ja

ryhmäpaineeseen. Uusi laite voidaan hankkia, koska kuluttajalla ei ole riittävästi tietoa rikkoutuneen tai huonosti toimivan laitteen korjaamisesta tai takuun kestosta. Älypuhelimen voi usein korjata, vaikka käyttäjä ei pidäkään sitä vaihtoehtona. Joissain tapauksissa korjauskustannukset (työ ja varaosat/komponentit) voivat olla suuremmat kuin uuden laitteen hinta, ja harvinaisemmille laitteille sopivia varaosia ei välttämättä ole saatavilla.

Älypuhelimet ovat nopeasti kehittyvä tuoteryhmä, ja uudet ominaisuudet, muotoilut ja tuotemerkit vaikuttavat niiden kysyntään. Siksi halu saada uusi, ominaisuuksiltaan parempi puhelin voi vaikuttaa kuluttajan hankintapäätökseen, vaikka vanha puhelin olisi yhä toimiva. Älypuhelinten ulkomuoto ei enää muutu yhtä dramaattisesti uusissa malleissa, joten estetiikan merkitys on pienempi kuin ennen. Organisaatioasiakkailla rikkinäinen tai viallinen puhelin yleensä vaihdetaan uuteen sen sijaan, että se korjattaisiin. Tätä toimintatapaa voi yksittäisen käyttäjän olla vaikea muuttaa, vaikka laitteen tosiasiallinen käyttäjä haluaisikin korjata puhelimen.

Tuotteen suunnittelupäätökset vaikuttavat myös kestävyyteen, käyttöikään, korjattavuuteen ja siihen, miten hyvin laitteen arvo säilyy. Suunnitteluongelmaksi on mainittu myös ohjelmistotuen tarjoaminen, sillä valmistajien ohjelmistotuki päättyy tietyn ajan jälkeen. Kun ohjelmistoa ei enää tueta, laitteen käyttöikä usein päättyy, sillä sen suorituskyky vähenee, toiminnallisuudet rajoittuvat ja se on alttiimpi verkkouhille. Ohjelmiston tuki voi monissa tapauksissa päättyä nopeastikin, mikä käytännössä estää pidemmät elinkaaret. Ohjelmiston päivitettävyyden vaikutusta myös mm. kotitalouslaitteiden elinkaariin tulisi tutkia myös vielä enemmän, sillä nämäkin laitteet kehittyvät ja ovat yhteydessä verkkoon ja muihin älysovelluksiin. Ohjelmistotuen puute nähdään myös lainsäädännön ongelmana, sillä lainsäädäntö ei toistaiseksi vielä kiellä näitä elinkaarta lyhentäviä toimintatapoja.

Haastatelluilla oli parannusehdotuksia, joilla nämä haasteet voitaisiin ratkaista ja älypuhelinten elinkaarta pidentää. Kaikki vastaajat olivat yhtä mieltä siitä, että parempi tietoisuus vastuullisuus- ja raaka-ainekysymyksistä voisi parantaa kulutustottumuksia, elinkaaren aikaista läpinäkyvyyttä ja koko toimitusketjun vastuullisuutta. Kuluttajat tarvitsevat ja heille on tarjottava enemmän tietoa korjattavuudesta, takuista, laitteiden asianmukaisesta käsittelystä sekä vastuullisuudesta. Vaikka haastateltavilla olikin kiinnostusta aiheeseen ja vastuullisuuskysymyksiin liittyvää materiaalia saatavilla, järjestelmällisempi koulutus voisi olla tarpeen. Myyntitilanteissa voitaisiin myös ottaa huomioon, että jo myynnissä otettaisiin huomioon käyttäjien tarpeet mahdollisimman pitkäksi ajaksi. Vain ostajan nykyisiin tarpeisiin vastaaminen ei siis riitä, vaan myyjän tulisi huomioida myös tarvittavan muistikapasiteetin, ohjelmiston päivitettävyyden ja vaatimukset laitteiden yhteenliitettävyydelle. Osa vastaajista mainitsi, että olisi tärkeää kehitellä myös tiukempi lainsäädäntö, joka tukisi elinkaaren kaikkia näkökulmia, korjaamismahdollisuuksia sekä valmistajan vastuuta varaosien tarjoamiseen ja laitteiden ohjelmistotukeen.

Elinkaaren pidentämisen pullonkauloja:
- Puutteellinen tietoisuus korjattavuudesta ja takuista
- Liian korkeat korjauskustannukset, varaosia ei saatavilla
- Ohjelmistopäivitysten puute
- Riittämätön lainsäädäntö
- Vanhaan malliin kyllästyminen
- Korjaamisen sijaan automaattinen vaihtokäytäntö (organisaatioasiakkaat)

Ehdotuksia elinkaaren pidentämiseksi:
- Tietoisuuden lisääminen
- Tulevien tarpeiden huomiointi myynti-/ostovaiheessa
- Politiikan kehittäminen (esim. oikeus korjaamiseen, korjaustyön verotus)
- Vakuutusten ja takuukausien kattavampi käyttö

Tulevia trendejä

Haastattelun vastaajat ovat seuranneet alan kehitystä läheltä ja käytännön tasolla. Vaikka kiinnostus vastuullisuusaiheisiin voi vielä olla rajallista eikä aiheita välttämättä oteta huomioon hankintapäätöksissä, olivat vastaajat yksimielisiä siitä, että älypuhelinten raaka-aineisiin ja koko arvoketjun vastuullisuuteen liittyvät kysymykset tulevat olemaan entistä tärkeämpiä tulevaisuudessa. Sekä tuotteiden arvostus että tietoisuus niiden tuotannon kestävyysvaikutuksista ja raaka-aineiden lähteistä ovat kasvaneet viime vuosina, ja vastaajat arvioivat, että niiden merkitys kasvaa seuraavan viiden vuoden entisestään. Lisääntyvä datan käyttö, etäyhteydet ja 5G-verkon energiatehokkuus ovat tärkeitä myös ympäristönäkökulmasta, ja nämä

vaikuttavat epäsuorasti myös uusien laitteiden myyntiin. Hiilijalanjälkilaskelmat ja ekomerkinnät nostettiin esille tulevina trendeinä, jotka arvoketjun kaikkien toimijoiden on otettava huomioon. Raaka-aineisiin liittyvistä aiheista osa vastaajista mainitsi luonnonvarojen käytön, siihen liittyvät ympäristö- ja yhteiskunnalliset kysymykset sekä materiaalien kierrätyksen tulevaisuuden painopistealueiksi. Kuluttajat tulevat tukemaan ja vaatimaan myös uusia kiertotalouden liiketoimintamalleja, kuten kunnostusta, palvelullistamista ja päivitettävyyttä. Raaka-aineiden louhinnan ja puhelimen käytön välillä on myös selkeä irtikytkentä: älypuhelinten käyttäjät eivät välttämättä näe yhteyttä käyttämänsä tuotteen ja kaivosten välillä, sillä globaalit arvoketjut ovat pitkiä ja monimutkaisia ja käyttäjälle näkymättömissä.

Tulevia trendejä:
- Kasvava tietoisuus vastuullisuus- ja raaka-ainekysymyksistä
- Datan käyttö lisääntyy
- Ekomerkintöjen, hiilijalanjäljen, kiertotalouden ja luonnonvarojen käytön merkityksen kasvu
- Kierrätys, kunnostus ja päivitettävyys huomion kohteena

Yleiset vastuullisuushaasteet

Haastateltavat nostivat esille useita älypuhelinten raaka-aineiden käyttöön liittyviä kriittisiä haasteita. Näitä olivat esimerkiksi kuluttajien toiminta ja kuluttajien yleinen tietoisuus. Vastaajien mukaan kuluttajien tavoista voi päätellä, että he eivät ole vielä valmiita sijoittamaan vastuullisempiin tuotteisiin, vaikka kiinnostus vastuullisuutta kohtaan onkin kasvanut. Elektroniikassa esiintyy tietyn tasoista kognitiivista dissonanssia: vaikka käyttäjät olisivat tietoisia kestävän kehityksen haasteista, ei se näy käytännön hankintapäätöksissä. Tämä voi perustua myös siihen, että elektronisten laitteiden kestävyyshaasteista ei ole riittävästi tieteellistä tutkimusta. Tutkimusta tarvittaisiin esimerkiksi koko arvoketjun ympäristövaikutuksista, tuotteiden elinkaaren vaikuttavimmista vaiheista, sosiaalisten vaikutusten mittaamisesta, yksittäisten valmistajien vastuullisuusvaatimusten läpinäkyvyydestä ja luotettavuudesta. Laitteiden hinta on varsin matala, joten toistuvia hankintoja on helppo tehdä ja uusi voi joskus tulla jopa halvemmaksi kuin vanhan korjaaminen. Laitteet, joiden suunnittelussa painotetaan pidempää käyttöikää, ovat puolestaan kalliimpia. Lisäksi vanhentuneiden laitteiden keräysastetta ja kierrätystä pidetään heikkona. Puutteellinen kierrätys (kasvavien myyntimäärien lisäksi) kasvattaa globaaleja raaka-ainevaatimuksia ja vastaajat arvioivat, että kierrätys vaatisi lisää taloudellisia kannustimia.

Tärkeiksi haasteiksi mainittiin myös primaariraaka-aineiden hankintaan ja kaivosyhtiöiden vastuuseen liittyvät ongelmat, esimerkiksi vakavat ihmisoikeusongelmat, konfliktimineraalit sekä ympäristökatastrofit. Esille nousi, että vaikka media toisinaan nostaakin näitä aiheita esille, ne ovat silti epämääräisiä ja kaukana yksittäisen käyttäjän päätöksentekoon vaikuttavista tekijöistä. Laiteostajan saatavilla on hyvin rajallisesti tietoa, varsinkin vertailtukelpoista tietoa puhelinten primaarimateriaalin tuotantoprosesseista. Eurooppalaiset toimijat ovat kehittäneet uuden älypuhelinten merkintäjärjestelmän. Tämä vapaaehtoinen aloite pisteyttää matkapuhelinten ympäristötehokkuuden elinkaariarvion ja kiertotalousindikaattorien perusteella (kestävyys, korjattavuus, kierrätettävyys, ilmastotehokkuus ja resurssitehokkuus).

Lisääntyvä datan käyttö ja siihen liittyvät ympäristövaikutukset mainittiin keskeisinä kestävyysongelmina, vaikka se ei välttämättä laitteiden raaka-aineiden käyttöön. Haastatellut verkkooperaattorit mainitsivat siirtymän 4G:stä 5G-verkkoihin keinona, joka pienentää käyttövaiheen ympäristövaikutuksia. Tämä perustuu 5G:n parempaan energiatehokkuuteen. Absoluuttiset energiatehokkuushyödyt ovat kuitenkin epäselviä: jos mobiilidatan kulutus ei kasva merkittävästi, verkon kokonaisvaikutukset voivat pienentyä, mutta jos datankulutus kasvaa entisestään paljon, saattaa se kumota saavutetut hyödyt.

Älypuhelinten elinkaareen liittyvät yleiset vastuullisuushaasteet
- Raaka-aineiden hankintaan liittyvät sosiaaliset ja ympäristövaikutukset
- Kulutustavat, kognitiivinen dissonanssi
- Tavallisten laitteiden matalat hinnat, huippulaitteiden korkeat hinnat
- Kierrätys-/keräysongelmat, suunnittelu ei huomioi kierrätystä
- Kasvava datan käyttö ja siihen liittyvät ympäristövaikutukset
- Vanhojen verkkojen pienempi energiatehokkuus

4 HAASTEITA JA SUOSITUKSIA

Yleisesti oletetaan, että digitaaliset teknologiat tukevat yksilöiden ja yhteisöiden voimaantumista, hyvinvointia ja ekologisesti kestäviä talous- ja yhteiskuntajärjestelmiä, jotka vastaavat planeetan kantokykyä (Kiiski Kataja 2016). Tämä kuitenkin tuo esille kysymyksen, miten voimme käyttää digitalisaation tarjoamia mahdollisuuksia ympäristön, yhteiskunnan ja talouden kannalta mahdollisimman kestävällä tavalla. Tämän tutkimuksen painopiste on ollut tutkia, millaisia vaikutuksia digitalisaation vaatimilla mineraaliraaka-aineilla kokonaisuutena on sekä tuoda esille digitalisaatioon ja sen raaka-aineisiin liittyviä kestävyyshaasteita. Tapausesimerkit (älypuhelimet, älytelevisiot) ovat toimineet pohjana näiden kestävyyshaasteiden tarkastelulle, mutta tutkimuksessa on tarvittaessa tarkasteltu myös muita digitaalisia laitteita. Seuraavassa esitellään näihin perustuvia haasteita sekä suosituksia haasteista selviämiseen.

Suositukset on kohdistettu ensisijaisesti julkisille päättäjille, mutta ne vaativat muutoksia myös muilta sidosryhmiltä, kuten raaka-aine-, valmistus- ja kierrätysyrityksiltä, rahoitussektorilta ja kuluttajilta.

4.1 Elektronisten laitteiden raaka-aineet

ICT-laitteissa käytettyjen raaka-aineiden valikoima ja määrä kasvaa jatkuvasti ja nopeammin kuin koskaan ennen. Laaja valikoima erilaisia metalleja, usein myös kriittisiä metalleja tai muita erityismetalleja, mahdollistaa elektronisten komponenttien elektroniset, magneettiset, optiset tai mekaaniset ominaisuudet. Samaan aikaan tekninen kehitys ja tuotteiden kasvava kulutus luovat kysyntää entistäkin laajemmalle erikoismetallien valikoimalle. Koska myös laitteiden elinkaaret ovat lyhyitä ja kierrätys riittämätöntä, primäärimetallien kysyntä kasvaa. Kuluttajan näkökulmasta laitteiden palautus keräyspisteeseen on hyvä alku, mutta se ei vielä takaa, että arvokas sisältö saataisiin kierrätettyä. Edes hyvin toimivassa kierrätysjärjestelmässä kierrätysmateriaalit eivät yksin pysty vastaamaan elektroniikan kasvavaan materiaalikysyntään. Ongelmallista on myös, että kaivoksen käyttöikä (keskimäärin 30–50 vuotta) on huomattavasti lyhyempi kuin mineraaliesiintymiä muodostavat geologiset prosessit (tuhansia ja miljoonia vuosia). Tämä tekee metallin louhinnasta kestämätöntä, sillä taloudellisesti hyödynnettävät mineraaliesiintymät käytetään ennen kuin luonnolliset prosessit ehtivät täydentää niitä (Jowitt ja muut 2020). Metallit säilyttävät fysikaaliset ominaisuutensa käytännössä ikuisesti, eli jos elinkaari suunnitellaan ja sitä hallitaan hyvin, materiaalia voidaan käyttää jopa ikuisesti.

Näiden arvokkaiden metallien louhintaan ja prosessointiin liittyy huomattavia ympäristövaikutuksia. Joissain tapauksissa vaikutukset liittyvät myös huonoihin työoloihin, ihmisoikeusrikkomuksiin, terveys- ja turvallisuusongelmiin ja korruptioon, varsinkin kehittyvissä maissa. Nämä vaikuttavat myös kaivoyhtiöiden toimintaan; jos paikalliset yhteisöt eivät hyväksy kaivostoimintaa eli sosiaalinen toimilupa menetetään, voi tämä johtaa myös tuotantolupien menettämiseen. Vaikutukset ovat suurempia maissa, joissa ympäristönsuojelulait ja niiden valvominen ovat heikkoja tai olemattomia. Malmiesiintymiä voidaan kuitenkin löytää vain paikoista, joissa olosuhteet ovat olleet suotuisia niitä luoneille geologisille prosesseille, eikä voida taata, että juuri ne alueet olisivat teknologisesti ja yhteiskunnallisesti kehittyneitä ja alueiden kaivokset olisivat vastuullisia. Sektorin haasteita ovat myös tietyt raaka-aineisiin liittyvät kysymykset, kuten konfliktimineraalit ja läpinäkyvyyden puute.

Suosituksia:

- Suunnittelu (materiaalit ja tuotteet). Suunnittelusuositukset voidaan ottaa käyttöön yrityksissä suoraan, mutta myös julkisen sektorin on tuettava suunnittelunäkökulmien sisällyttämistä yritysten omiin prosesseihin. Toisaalta useiden älylaitteiden suunnittelu tapahtuu Suomen ulkopuolella, joten suunnitteluun liittyvät suositukset voidaan nähdä myös yleisinä kehityspolkuina, joita EU:n on tärkeä ajaa yhdessä eteenpäin.
  - Kestävän kehityksen ja kiertotalouden sisällyttäminen tuote-, komponentti- ja materiaalisuunnitteluun.
  - Ympäristömyötäisen tuotesuunnittelun toteutus siten, että se hyödyntää raaka-aineiden maksimaalisen arvon koko tuotteen elinkaaren ajan.

  - Ympäristömyönteisen tuotesuunnittelun toteutus siten, että se huomioi pidemmät elinkaaret ja lisää laitteiden korjattavuutta ja kierrätystä.
  - Kierrätysmateriaalien hyödyntäminen laitteissa.
  - Komposiittien ja muiden vaikeasti kierrätettävien materiaalien korvaaminen helposti kierrätettävillä materiaaleilla.
  - Kriittisiä raaka-aineita sisältävien materiaalien korvaaminen runsaasti saatavilla olevilla ja uusiutuvilla raaka-aineilla.
  - Ihmisille tai ympäristölle haitallisten aineiden käytön asteittainen lopettaminen. Kantajametallien (ks. osa 3.6.1) tapauksessa on punnittava huolellisesti haitallisten aineiden käyttöä ja niiden hyötyjä kierrätystehokkuudelle, kunhan aineiden tiukka valvonta voidaan taata.
  - Digitaalista jäljitettävyyttä parantavien ratkaisujen suunnittelu siten, että ne tukevat kiertotaloutta ja kestävää kehitystä.
- Toimitusketju
  - Kattavan sääntelyn kehittäminen valmistajille kriittisten raaka-aineiden tai konfliktimineraalien hankintaan. Otettava käyttöön myös vaatimustenmukaisuutta valvova järjestelmä.
  - Uusien, vaatimustenmukaisuuden ylittämiseen tähtäävien kannustimien kehittäminen teollisuudelle.
  - Raaka-aineiden vastuullisen hankinnan vahvistaminen luomalla hankintaohjeistuksia ja osallistumalla aktiivisesti teollisuuden aloitteisiin.
- Tietoisuuden lisääminen
  - ICT-laitteissa käytettävien materiaalien ja niiden lähteiden läpinäkyvyyden ja jäljitettävyyden lisääminen sekä uusioraaka-aineiden käytön lisääminen. Tämä voidaan saavuttaa digitaalisilla materiaali- tai tuotepasseilla, jotka sisältävät tuotekohtaista tietoa raaka-aineista ja joilla voidaan myös helpottaa kierrätystä.
  - Kuluttajatietoisuuden lisääminen laitteiden sisältämistä raaka-aineista ja niiden kierrätyksestä.
- Infrastruktuurin ja kapasiteetin kehittäminen
  - Primaarituotannon parantaminen kehittämällä ja soveltamalla käytäntöjä ja sääntelyä, jotka lieventävät materiaalien sosiaalisia ja ympäristövaikutuksia.
  - Käytöstä poistettujen laitteiden kierrätyskapasiteetin ja rikastusjätteen käsittelykapasiteetin kasvattaminen. Toimivien uusiomateriaalimarkkinoiden luominen.
  - Sellaisten kierrätyslaitosten tukeminen ja lisääminen, jotka eivät kierrätä materiaaleja vain alkuainetasolla vaan myös materiaaliyhdisteitä.
  - Keräyslogistiikan parantaminen esim. yritysten takaisinotto-ohjelmilla.
- Taloudelliset kannustimet
  - Investointituen myöntäminen kierrätyskapasiteetin ja puhtaan, resurssitehokkaan primaarituotannon kasvattamiselle.
  - Uusien taloudellisten kannustinten luominen uusioraaka-aineiden käytölle tuotteissa ja prosesseissa. Kierrätyslähteistä saatavien metallien käsittely on primaarilähteisiin verrattuna yleensä resurssitehokkaampaa, minkä tulisi näkyä myös metallien hinnassa.

4.2 Huoltovarmuus

Huoltovarmuus liittyy kiinteästi raaka-aineiden saatavuuteen. ICT-laitteiden raaka-aineisiin ja valmistukseen EU:ssa liittyy tällä hetkellä kaksi haastetta: 1) Suurin osa elektroniikkaan tarvittavista mineraaliraaka-aineista tuodaan Aasiasta ja Afrikasta; ja 2) Laitteet ja niiden komponentit valmistetaan pääasiassa Aasiassa. EU on siis riippuvainen sekä raaka-aineiden että laitteiden tuonnista (Bobba ja muut 2020). Digitalisaatio on EU:lle strategisesti hyvin tärkeä kehitysalue, minkä takia tämä riippuvuus on merkittävä haaste EU:n huoltovarmuudelle. Ilmastoneutraaliuteen ja digitaaliseen talouteen nojaavan Euroopan kehitys on riippuvainen vastuullisesti tuotettujen, edullisten raaka-aineiden saatavuudesta. Tuonnin varmistamisessa vakaa kauppapolitiikka on yksi raaka-aineiden vakaan tuontivirran keskeisistä kysymyksistä (Bobba ja muut 2020). Kauppapolitiikan vakautta voi kuitenkin olla vaikea pitää yllä nopeasti ja jatkuvasti muuttuvassa maailmassa, jossa valtiot ja alueet kilpailevat resursseista.

Useat tekijät vaikuttavat raaka-aineiden tarjontaan. Esimerkiksi suuri kysyntä nostaa hintoja, jolloin malminetsintä-, louhinta- ja jalostushankkeista

sekä raaka-aineiden korvaamisesta toisilla raaka-aineilla ja kierrätyksestä tulee kannattavampaa. Useiden raaka-aineiden hinnat ovat kuitenkin tällä hetkellä matalalla, eli tulevaan kapasiteettiin investoiminen ei ole kannattavaa. Tämä vaikuttaa epäsuorasti myös metallien kierrätykseen, joka voi joidenkin raaka-aineiden kohdalla muuttua kannattamattomaksi. Louhinta- ja jalostuskapasiteetin kasvattamisen tekniset mahdollisuudet ovat myös tärkeässä roolissa, ja samoin kuin kaivostoiminnan poliittinen kehys. Kaikki tekijät yhdessä määrittelevät tulevan tarjonnan joustavuuden.

Globalisaation myötä valmistava teollisuus on suurilta osin muuttanut kehittyviin maihin, ennen kaikkea Kiinaan. Tämä näkyy varsinkin komponenteissa, esimerkiksi mikrosiruissa. Syitä on useita, ja ne liittyvät usein saavutettaviin tuottavuusetuihin, kuten verojen välttelyyn ja kiertoon sekä kohdemaiden minimaaliseen ympäristölainsäädäntöön, työvoimakustannuksiin ja työntekijöiden oikeuksiin. Siksi Eurooppa onkin riippuvainen tuonnista näistä maista. Näihin haasteisiin on viime aikoina etsitty ratkaisuja erilaisista poliittista aloitteista (esim. Digital Europe 2019), joissa on kehitetty paikallista ICT-valmistusteollisuutta kannustinten ja sääntelyn tuella.

Raaka-aineiden paikallista saatavuutta ja tuotantoa on yritetty tukea kannustimilla useissa EU:n politiikoissa jo vuosikymmenen ajan. Paikallisten yhteisöiden ja yhteiskunnan suhtautuminen kaivostoimintaan on kuitenkin keskeinen aihe EU:ssa, sillä louhintaa vastustetaan usein (esim. Badera 2014, Kivinen ja muut 2020). Esimerkki tästä on mm. Suomessa aktivoitunut akkumineraalien etsintä, joka on herättänyt vastustusta (Eerola 2021a). Nyt kaivataankin kestävämpiä sosiaalisia ja ympäristökäytäntöjä noudattavaa, vaikutuksiaan minimoivaa kaivostoimintaa. Vain niin voidaan kaivostoiminnalle saada paikallisten yhteisöjen, sidosryhmien ja koko yhteiskunnan hyväksyntä. Tähän voidaan päästä toisaalta yritysten toiminnallisten muutosten ja vahvemman yhteiskuntavastuun kautta, toisaalta valtioiden ja EU:n kannustimilla ja pakottavalla lainsäädännöllä. Samanaikaisesti myös EU:n kierrätystä tulisi kehittää tehokkaampaan suuntaan ja siten vähentää primääriraaka-aineiden tuotannon ja tuonnin tarvetta.

Suosituksia

- Suunnittelu (materiaalit ja tuotteet)
  - Raaka-aineiden saatavuuden ja kiertotalouden sisällyttäminen suunnitteluvaatimukseksi.
  - Kriittisiä raaka-aineita sisältävien materiaalien korvaaminen muilla kuin kriittisillä raaka-aineilla. Jos näitä ei voida korvata, niin suunnittelussa tulisi ottaa huomioon näiden kriittisten materiaalien kierrätys. Tämä puolestaan parantaa huoltovarmuutta vahvistamalla eurooppalaisten uusioresurssien käyttöä.
  - Teknisen suorituskyvyn ja raaka-aineiden käytön (varsinkin erikoismetallien käytön) välisen yhteyden saattaminen läpinäkyviksi, jonka avulla tätä voidaan hyödyntää myös tuotekehityksessä. Näin haluttuja suorituskykytekijöitä voidaan tarkastella kriittisesti suhteessa niiden vaatimiin raaka-aineisiin.
  - Uusioraaka-aineiden ja kierrätysmateriaalien käytön lisääminen.
  - Jäljitettävyyttä tukevien digitaalisten ratkaisujen kehittäminen siten, että niiden avulla pystytään seuraamaan ja tukemaan myös kierrätettyä materiaalia.
- Toimitusketju
  - Vastuullisempien hankintakäytäntöjen kehittäminen siten, että ne tukevat myös teollisuuden sivuvirtojen tai vanhojen rikastusjätteiden hyödyntämistä.
- Tietoisuuden lisääminen
  - Kuluttajien tietoisuuden lisääminen yleisestä huoltovarmuudesta, EU-tason digitalisaatiopyrkimyksistä ja EU:n datastrategiasta. Tämä tuo läpinäkyvyyttä siihen, että voimakas digitalisaatio vaatii myös resursseja ja raaka-aineita. Tämä ja muut vastaavat raportit vastaavat näihin vaatimuksiin yleisellä tasolla, mutta jatkossa tätä työtä tukemaan tarvitaan myös muita kestävyysnäkökulmia ja eri sidosryhmille suunnattua materiaalia.
- Infrastruktuurin ja kapasiteetin kehittäminen
  - ICT-laitteiden kierrätyksen lisääminen esim. parantamalla keräystä ja lisäämällä kierrätystehokkuutta ja -kapasiteettia EU:ssa, jotta kierrätyksestä saatavat mineraaliraaka-aineet pysyvät käytössä.
  - Jotta kaivosteollisuuden malminetsintä ja louhinta hyväksytään EU:ssa, teollisuuden on kehitettävä toimintaansa ja julkisuuskuvaansa vastuullisempaan suuntaan.

4.3 Elinkaaren pituus

Suurinta osaa ICT-laitteista ei suunnitella siten, että ne olisi helppo korjata, niiden elinkaari olisi pitkä tai ne voitaisiin valmistaa helposti kierrätettävistä materiaaliyhdistelmistä. Edellisissä tutkimuksissa mainittu älypuhelinten käyttöikä oli 4,5–5 vuotta vuonna 2005 (Bakker ja muut 2014), ja tällä hetkellä älypuhelimen käyttöikä on enää puolet siitä, noin 21 kuukautta (Lu 2017). Laitteiden ja komponenttien teknisten ominaisuuksien ja käytettyjen materiaalien puolesta käyttöikä voisi olla pidempi. ICT-laitteiden lyhyet elinkaaret aiheuttavat valmistajille raaka-ainepaineita, kun kysyntään vastaamiseen tarvitaan jatkuvasti enemmän kriittisiä ja harvinaisia alkuaineita. Useita ICT-laitteita ei myöskään ole suunniteltu helposti korjattaviksi. Alkuperäisiä vaihtokomponentteja ei ole saatavilla, eivätkä kuluttajat tiedä, milloin älypuhelimen voisi yhä korjata. Myös korjaamisen suuret työvoimakustannukset vaikeuttavat älypuhelinten elinkaaren pidentämistä.

Ohjelmistotuki vaikuttaa laitteen elinkaareen merkittävästi, ja se koskee ennen kaikkea tulevaisuuden IoT- ja älylaitteita. Ohjelmistotuen kesto riippuu siitä, kauanko valmistaja haluaa tukea tarjota ja kuinka kauan päivitykset ovat laitteen puolesta mahdollisia. Jos ohjelmistotukea ei ole saatavilla, älypuhelin voi vanhentua ennen aikojaan, vaikka itse laitteessa tai sen komponenteissa ei olisi vielä mitään vikaa (Watson ja muut 2017). Haastattelujen mukaan kuluttajat pitävät kunnostettuja älypuhelimia entistä myönteisempinä asioina. Kunnostukseen liitetyt ympäristöhyödyt ja niiden tunteminen vaikuttavat positiivisesti kuluttajien kiinnostukseen ja ostoaikeisiin. Kuluttajat ovat kuitenkin entistä tietoisempia vanhempien puhelimien ohjelmistopäivityksiin liittyvistä rajoituksista eivätkä siksi välttämättä halua ostaa vanhempia, muuten toimivia laitteita.

Euroopan komission kiertotalouden toimintasuunnitelman tavoitteena on kehittää elektroniikan ja ICT-laitteiden kiertotalouden huomioivaa suunnittelua. Näitä parannuksia ovat ekosuunnittelu, korjauttamisoikeus, yleislaturin käyttöönotto, EU:n laajuisen vanhojen laitteiden vastaanottojärjestelmän toimeenpano, sekä sähkö- ja elektroniikkalaitteiden vaarallisten aineiden rajoitukset. Näiden parannusten toimeenpano on vielä kesken, sekä etenkin niiden siirtäminen myös EU:n ulkopuolelle on epävarmaa.

Suosituksia

- Suunnittelu (materiaalit ja tuotteet)
  - Elinkaaren pidentäminen suunnittelu-parannuksilla, esim. ekosuunnittelun avulla. Suunnitteluvalinnat parantavat laitteen kestävyyttä, korjattavuutta, uudelleenvalmistamista ja päivitettävyyttä sekä komponenttien, seosten ja alkuaineiden kierrätettävyyttä/uudelleenvalmistamista.
  - Ohjelmistopäivitysten tarjoaminen niin kauan kuin fyysinen laite toimii. Tämä tulisi ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Vaihtoehtoisesti sen varmistaminen, että laitteeseen voidaan asentaa kolmannen osapuolen käyttöjärjestelmä sen jälkeen, kun virallista ohjelmistotukea ei enää tarjota.
- Tietoisuuden lisääminen
  - Kuluttajien tietoisuuden parantaminen kahden vuoden lakisääteisestä takuujaksosta, joka suojelee viallisilta tuotteilta tai tuotteilta, jotka eivät toimi kuten on mainostettu tai näytä luvatulta. Kahden vuoden lakisääteinen takuujakso koskee kaikkia EU:ssa myytyjä tuotteita. Takuu ei liity vain puhelimiin vaan kaikkiin EU:ssa myytyihin tuotteisiin.
  - Vaikuttaminen kuluttajien haluun ostaa uusi laite, vaikka vanhaa voi vielä käyttää. Usein tarve uuden laitteen ostamiseen johtuu markkinoinnista, ryhmäpaineesta tai muista syistä, jolloin kuluttajaa voidaan tuupata oikeaan suuntaan esimerkiksi esittelemällä tarpeettoman kulutuksen aiheuttamia vaikutuksia.
- Infrastruktuurin kehittäminen
  - Korjauspisteiden perustamisen tukeminen.
  - Sellaisen ohjauksen luominen, joka tehokkaasti tukee laitteiden korjausta ja ohjelmistopäivityksiä, varaosien saatavuutta, korjausohjeiden tarjoamista ja yleisesti ottaen mahdollistaa yleisen korjaamisoikeuden toimeenpanoa.
  - Laitteiden ”pöytälaatikossa säilyttämisen” minimointi keräyspisteitä lisäämällä ja tukemalla, luomalla käytettyjen tuotteiden myyntialustoja.
- Julkinen hankinta
  - Korjattavuuden, kunnostettujen ICT-laitteiden sekä palvelu-/vuokraussopimusten suosiminen julkisten hankintojen keskeisenä kriteerinä. Näistä on useita aloitteita jo

olemassa Euroopassa, mm. Circular and Fair ICT Pact (CFIT 2021).
- Taloudelliset kannustimet
  - Korjaustoimintaan kannustaminen alentamalla korjaustyön ja varaosien verotusta.
  - Puhelinvalmistajien ja muiden ICT-laitteita valmistavien yritysten tukeminen, jotka tarjoavat vuokraus- ja tuote palveluna -malleja ja joilla taataan tuotteen käyttöiän pidentäminen.
- Sääntely
  - Pakollisen merkinnän vaatiminen tuotteen käyttöiästä, lakisääteisen takuun linkittäminen käyttöikään sekä varaosien saatavuuden varmistaminen. Arvoketjut ovat luonteeltaan globaaleja ja valmistaja pääasiassa Kiinassa tai Yhdysvalloissa, joten vaatimusten olisi koskettava laajempaa maantieteellistä aluetta kuin nykyisen lainsäädännön mukaan on mahdollista.

4.4 Hankinta ja käyttö

Nykyiset hankinta- ja kulutusmallit ovat aiheuttaneet sen, että kotitalouksissa erilaisten elektronisten laitteiden määrä on kasvanut räjähdysmäisesti. Eurooppalaisessa keskivertokotitaloudessa on 72 sähkö- ja elektroniikkalaitetta, joista 11 on rikki tai muuten pois käytöstä. Kuluttajat eivät aina vie rikkinäisiä laitteita kierrätykseen tai anna käyttämättömiä laitteita toisen käyttäjän käyttöön. Älypuhelimen tyypillinen elinkaari on 2–3 vuotta, ja koska laitteet ja niiden materiaalit heitetään pois tai siirtyvät pöytälaatikkoon 1–3 vuoden kuluessa, aiheutuu raaka-ainepaineita nopeasta hankinta ja toisaalta hitaasta kierrätyssyklistä. Raaka-aineiden näkökulmasta miljoonia tai miljardeja vuosia sitten muodostuneen materiaalin pois heittäminen muutaman käyttövuoden jälkeen on kohtuutonta. Kuluttajilla, julkisilla hankkijoilla, tuottajilla, vähittäismyyjillä ja verkkoyhtiöillä on kaikilla merkittävä rooli siinä, millaisia toiminnallisuuksia älypuhelimilta odotetaan ja miten niitä suunnitellaan ja tuotetaan. Tämä kaikki vaikuttaa raaka-aineiden tarpeeseen. Kuluttajat kertovat yhä useammin, että haluavat älypuhelimen olevan vastuullisesti tuotettu sekä helppo purkaa, korjata ja kierrättää. Sama pätee myös muihin elektronisiin laitteisiin. Haastatteluiden perusteella näitä odotuksia ei kuitenkaan välttämättä lI käytäntöön, eivätkä ne näytä vaikuttavan ostopäätökseen. Ostajilla, niin kuluttajilla kuin julkisilla ja muilla hankkijoilla, on vain vähän tietoa luotettavista vastuullisuusstandardeista ja siitä, minkä kriteerien perusteella vastuullisia hankintapäätöksiä voi tehdä. Kuluttajat mm. tuntevat myös huonosti minimitakuuajat, mikä voi olla este tuotteiden pidemmälle käyttöiälle. EU:n kuluttajamyyntidirektiivi määrittelee kahden vuoden lakisääteisen takuun kaikille EU:ssa myydyille tuotteille.

Kun tarkastellaan laitteiden käyttövaihetta, ICT-sektorin ympäristöjalanjäljen suurimmat aiheuttajat ovat energiankulutus ja sen kasvihuonekaasupäästöt, joiden oletetaan kasvavan tulevaisuudessa entisestään, kun datan siirto, etäkäyttö jne. lisääntyvät. Luonnonvarojen käytön näkökulmasta elinkaaren pidentämisellä on huomattavia vaikutuksia raaka-aineiden riittävyyteen. Elinkaaren pituuteen ei kuitenkaan vaikuta vain laitteen suunnittelu, vaan myös kuluttajan käyttäytyminen. Puutteelliset tiedot, huono käsittely ja ryhmäpaine liittyvät haastattelujen perusteella lyhyisiin elinkaariin. Uusi laite voidaan hankkia ennen aikojaan, koska kuluttajalla ei ole riittävästi tietoa rikkoutuneen tai huonosti toimivan laitteen korjaamisesta tai takuun kestosta.

Suosituksia

- Suunnittelu (materiaalit ja tuotteet)
  - Tuotteiden suunnitteleminen siten, että laitteet soveltuvat esim. helposti jaettaviksi ja yhteiskäyttöisiksi.
- Tietoisuuden lisääminen
  - Ostajien (sekä kuluttajien että organisaatio-ostajien) tietoisuuden parantaminen ICT-laitteiden vastuullisuusvaikutuksista. Tämän tiedon olisi oltava saatavilla jo hankintatilanteessa. Tieto on parhaimmillaan standardoitua, jotta eri laitteita voidaan vertailla toisiinsa, sekä kolmannen osapuolen varmentamaa.
  - Ostajien (sekä kuluttajien että organisaatio-ostajien) tietoisuuden parantaminen ympäristömerkinnöistä ja vastuullisuusstandardeista hankintapäätösten tukemiseksi.
  - Kuluttajien tietoisuuden parantaminen siitä, että mitkä ovat vaihtoehdot uuden ostamiselle ja omistamiselle, esim. käytetyn laitteen ostaminen tai laitteen vuokraaminen.
  - Kuluttajien tietoisuuden parantaminen jo hankintahetkellä myös käytön ympäristövaikutuksista, sekä esim. takuista, asian-

mukaisesta käytöstä ja suojavarusteista (esim. näytön suojakaloista).
- Valmistajan vaatimukset
  - Kuluttajien tietoisuuden parantaminen myös vaatimalla tietoja suoraan valmistajalta. Valmistajien ja koko toimitusketjun on lisättävä läpinäkyvyyttä, annettava asiakkaille tietoa erilaisista kestävyysvaikutuksista ja tarvittaessa myös julkistamaan tiedot ja menetelmät, joilla vaikutukset on arvioitu.
  - Valmistajan on tarjottava ja jaettava tietoa siitä, miten käyttäjät voivat pidentää laitteiden elinkaarta.
  - Valmistajan siirtyminen palvelupohjaiseen malliin, jossa laitteita tarjotaan vuokralle. Mallin tulisi painottaa ansaintalogiikkaa, jossa tuotteesta saatu voitto on sitä suurempi, mitä pidempään käyttäjä on laitteeseen tyytyväinen.
- Julkinen hankinta
  - Raaka-aineiden hankinnan läpinäkyvyyttä ja vastuullisuutta korostavien hankintaohjeiden käyttöönotto.
- Taloudelliset kannustimet
  - Taloudellisten julkisten kannustinten luominen myös kuluttajille, jotta haluavat ja pystyvät taloudellisesti suosimaan kestävämpiä laitteita hankintapäätöksessään. Lisäksi, esimerkiksi panttijärjestelmän luominen on taloudellinen kannustin, jonka ostaja voi ottaa huomioon jo hankintavaiheessa.

4.5 Sähkö- ja elektroniikkaromu ja kierrätys

SER-virran nopea kasvu on ongelma ja sen takia elinkaarensa päässä olevat ICT-laitteet tulisi kerätä ja käyttää uudelleen tai kierrättää. Jopa 82,6 %:a SER:sta ei kuitenkaan dokumentoida, kerätä ja kierrätetä asianmukaisesti (Forti ja muut 2020). Ongelma johtuu useasta syystä: vanhoja laitteita ei haluta palauttaa, keräysinfrastruktuuri ei ole riittävän toimiva ja resurssitehokasta erottelu- ja kierrätyskapasiteettia tulisi kehittää tai laajentaa globaalisti. Useiden ICT-laitteissa olevien metallien osalta metallurgisten prosessien tekniset rajoitukset vaikuttavat pieninä määrinä esiintyvien erityismetallien talteenottoasteeseen. Uusiomateriaalien talteenotto ei ole helppoa, koska laitteet ovat niin pieniä. Erikoismetalleja on usein vain hyvin vähän, ja sekin usein katoaa kierrätysprosessissa sivuvirtoihin tai pölyihin. Elektronisten laitteiden 100-prosenttinen kierrätys ei ole tällä hetkellä ympäristön kannalta kannattavaa (Reuter & van Schaik 2012). Siksi pitäisikin ensisijaisesti lisätä korjattavuutta ja uudelleenkäyttöä, toiseksi kehittää uudelleenvalmistusta (komponenttien uudelleenkäyttöä), kolmanneksi lisätä materiaaliseosten kierrätystä ja vasta neljänneksi kierrättää materiaalit alkuaineiden tasolla.

SER-romussa on yhteensä yli 1 000 eri kemikaalia, joista useat ovat vaarallisia. SER-virrat päätyvät joissain maissa edelleen kaatopaikoille ja saastuttavat ympäristöä erilaisilla haitallisilla aineilla. Nykyinen kierrätysteknologia keskittyy taloudelliseen kannattavuuteen, ei kierrätysasteeseen tai kriittisiin metalleihin. Tämä voi johtaa kriittisten kierrätysmateriaalien epätasaiseen saatavuuteen.

Suosituksia

- Suunnittelu (materiaalit ja tuotteet)
  - Kierrätysnäkökulmien sisällyttäminen suunnitteluun. Tähän vaaditaan syvällistä metallurgista osaamista, jotta valitaan komponentteja, jotka on mekaanisesti helppo erotella toisistaan tai materiaaliyhdisteitä, jotka on kemiallisesti helpompi kierrättää.
  - Sellaisten materiaaliyhdisteiden priorisointi, jotka voidaan kierrättää sellaisenaan ja jotka eivät vaadi täyttä alkuainetason erottelua. Suunnittelu noudattaa parhaimmillaan paremmuusjärjestystä: 1) Parannetaan korjattavuutta ja uudelleenkäyttöä 2) kehitetään uudelleenvalmistusta ja komponenttien uudelleenkäyttöä 3) kierrätetään materiaaliyhdisteet ja 4) kierrätetään materiaalit alkuaineiden tasolla.
  - Materiaalien tunnistusjärjestelmien käyttöönotto, joiden avulla kierrätysorganisaatiot voivat tunnistaa laitteiden sisältämät materiaalit paremmin ja tämän tiedon avulla parantaa kierrätysprosessin tehokkuutta.
- Tietoisuuden lisääminen
  - Kuluttajien ja yritysten tietoisuuden parantaminen siitä, minne SER-romu päätyy (kuinka suuri osa laitteiden materiaalisisällöstä kierrätetään Suomessa, kuinka suurta osaa ei voida kierrättää, kuinka suuri osa päätyy ulkomaille kierrätykseen, kuinka suuri osa päätyy ulkomaille kaatopaikalle).
  - Tietoisuuden kasvattamisen avulla myös kuluttajien halukkuutta tuoda vanhat, käyt-

tämättömät laitteensa yleisiin keräyspisteisiin lisätään.

- Kierrätyskapasiteetin kehittäminen
  - SER-keräyksen ja kierrätysinfrastruktuurin kehityksen tukeminen mahdollisimman tehokkaalla keräyslogistiikalla ja riittävällä kapasiteetilla, jotta saavutetaan mittakaavaetu. Vaihtoehtoisesti voidaan lisätä myös entistä selektiivisempiä pienen mittakaavan kierrätysteknologioita.
  - Laitteita kunnostavien tahojen osallistumisen tukeminen kierrätettyjen tuotteiden markkinoille.
  - Globaaliin SER-haasteeseen osallistuminen siten, että pyritään käsittelemään kehittyvien maiden SER-massoja tai tukemaan niiden paikallista, vastuullisempaa käsittelyä. Tähän osallistumalla mm. valmistajakin voisi kompensoida omien uusien tuotteiden markkinoille tuontia.
  - Kierrätykseen ja kierrätysasteisiin liittyvien EU-direktiivien ja kansallisen lainsäädännön yhdenmukaistaminen, sekä kierrätystä estävien ohjauskeinojen poistaminen.
- Valmistajan vaatimukset
  - Valmistajien tai jälleenmyyjien takaisinottojärjestelmien tukeminen. Näiden avulla laitteet saadaan kerättyä paremmin ja niistä saatavat metallit saatettua kierrätyksen piiriin.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

5.1 Tarvitaan järjestelmätason suunnittelua, kestävää kulutusta, vastuullisia tuotantoprosesseja sekä kiertäviä materiaalivirtoja

Tarvitsemiemme luonnonvarojen syntyyn kuluva aika ja aika, jonka ne tuottavat arvoa yhteiskunnallemme, ovat merkittävässä epäsuhdassa. Metallien etsintään ja louhintaan tarvitaan aikaa, työtä ja investointeja, ja niistä aiheutuu huomattavia sosiaalisia ja ympäristövaikutuksia. Näillä luonnonvaroilla kuitenkin on ominaisuuksia, joita digitalisaatiossa tarvitaan – eikä tämä yhteys aina ole yhteiskunnallisille toimijoille selvä. Nykyinen digitalisaation trendi ei ole lupaava: arvokkaita metalleja käytetään tuotteissa, joiden elinkaaret lyhenevät ja määrät kasvavat jatkuvasti. Myös tarvittavien metallien määrä kasvaa: yhteiskunnan uusiin teknologioihin ja toimintoihin tarvitaan lukuisia erikoismetalleja. Tuotteet ovat kompleksisia ja niissä saattaa olla 50–80 eri alkuainetta, mikä paitsi rasittaa primaarituotantoa myös vaikeuttaa tuotteiden kierrätystä (Kuva 16). ICT-ala kilpailee metalleista vihreään energiaan siirtymisen tarpeiden ja metallien muiden käyttökohteiden kanssa. Vielä ei tiedetä, mikä taho määrittelee, mistä metallin käyttötavasta on yhteiskunnalle eniten hyötyä; päätöksen tekevät joko markkinat ja muuttuvat hinnat tai päätöksentekijät.

Useita raaka-aineita tarvitaan ICT-laitteissa vain hyvin pieniä määriä, ja kun tarkastellaan absoluuttisia määriä, niiden kysynnäksi arvioidaan vain 0,5 % raaka-aineiden kokonaistarpeesta. Joten vaikka ICT kilpailee muiden sektorien kanssa samoista raaka-aineista ja niiden kysyntä saattaa kasvaa, ICT-alalle ei olisi odotettavissa raaka-ainepulaa. Asiaa monimutkaistaa ja sektoreiden välistä kytköstä alleviivaa se, että mitä pidemmälle digitalisaatio kehittyy ja laajenee, sitä enemmän energiaa tarvitaan, mikä puolestaan lisää vihreän energian tuotantoon tarvittavien raaka-aineiden määrää. Arvellaankin, että uusiutuvan energian ja sähköautojen tuotannon raaka-ainekysyntään ei ennen pitkää voida vastata. Jos uusia ratkaisuja ei esitetä, voi tilanne vaarantaa siirtymän vihreään energiaan (IEA 2021, Michaux 2021). Suurinta osaa ICT-raaka-aineista on runsaasti saatavilla, mutta vain EU:n ulkopuolella. EU on siis vahvasti riippuvainen tuonnista, mikä on huoltovarmuuden kannalta merkittävä haaste.

ICT-alan raaka-aineiden päähaasteet ovat siis seuraavat:

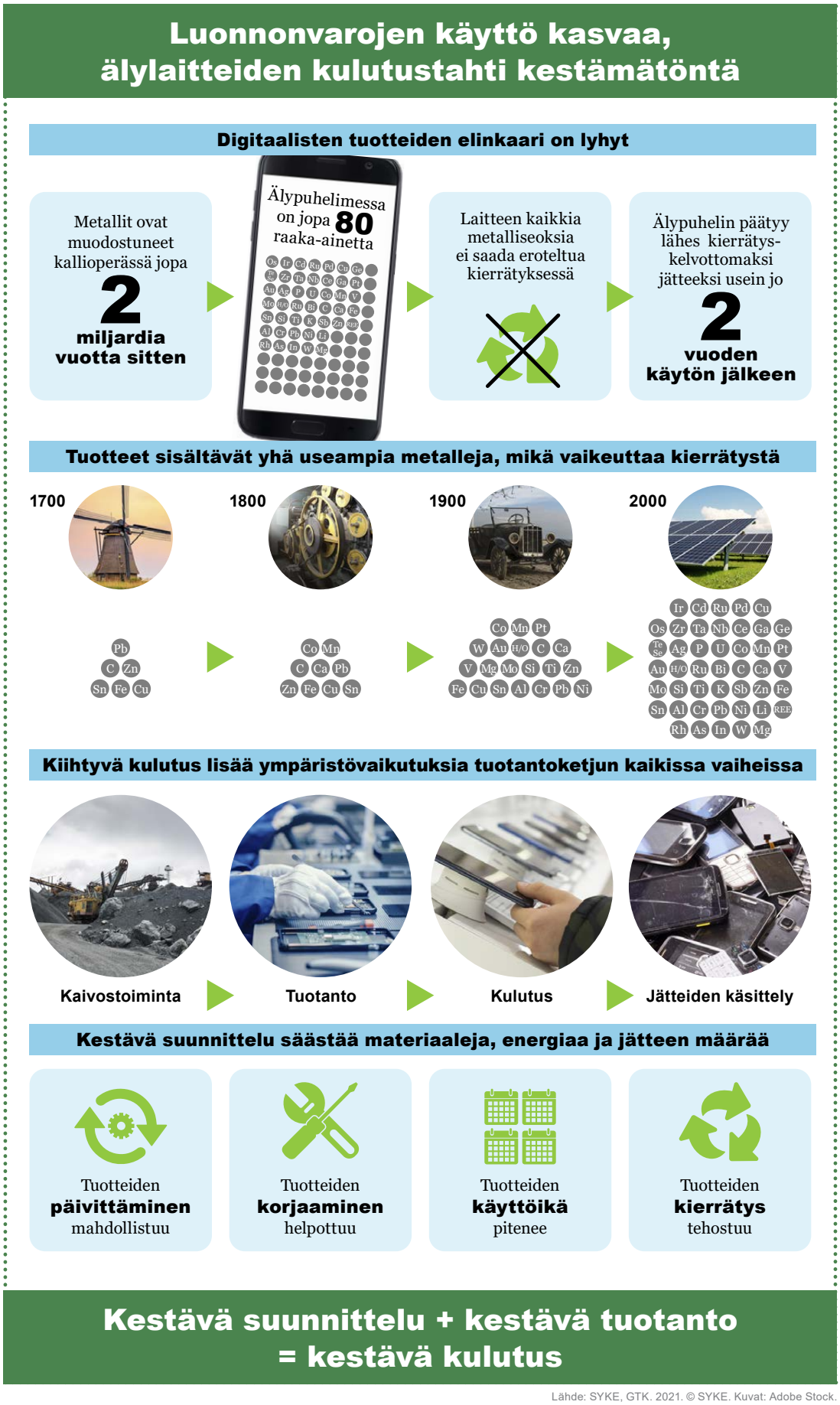
1. Kulutuksen kasvu esim. markkinoinnin, vaurastumisen ja tuotekehityksen vuoksi
2. Kasvava raaka-aineiden tarve
3. Kriittisten ja konfliktimineraalien käyttö
4. Kilpailu muiden teollisuuden sektorien kanssa (sähköinen liikkuvuus, uusiutuva energia)
5. ICT-tuotteiden lyhyt elinkaari
6. ICT-tuotteiden rajoitettu korjattavuus ja päivitettävyys
7. Epäsuhta ICT-raaka-aineiden muodostumiseen, etsintään ja tuotantoon kuluvan ajan ja käytön välillä
8. ICT-tuotteiden monimutkaistuminen: tarvittavien raaka-aineiden kasvava kirjo, entistä monimutkaisemmat raaka-aineseokset
9. ICT-tuotteiden kompleksisuus tekee niiden kierrätyksestä haastavaa
10. Tuonnista riippuvaisuus, toimitusvarmuus, kriittiset ja konfliktimineraalit (laitteet, komponentit ja raaka-aineet)

Nämä haasteet havainnollistavat sitä, että tarvitaan koko järjestelmän vastuullisuuden parantamiseen tähtääviä kiertotalouden ratkaisuja. ICT-laitteita koskevien ongelmien ratkaisemiseksi täytyy **kehittää järjestelmätason suunnittelua ja tuotteisiin liittyvää poliittista kehystä**. Myös **nykyisiä tuotanto- ja valmistusprosesseja ja kuluttajien käyttäytymistä on parannettava** merkittävästi. Alue on laaja, aina valmistajan vastuusta uudelleenkäyttöä ja kierrätettävyyttä parantaviin suunnittelupäätöksiin sekä kestämättömien, kasvavaan kulutukseen tähtäävien toimintamallien hylkäämiseen.

Vaikka asenteissa, politiikassa ja toimissa onkin käynnissä siirtymä kohti kestävämpiä ja vastuullisempia toimintamalleja, yksi jatkuvan talouskasvun vauhdittaja on kulutus, johon sekä yritykset että valtiot kannustavat jatkuvasti. Niinpä **kuluttajat** voivat olla ratkaisevassa roolissa ICT-laitteiden vastuullisuusvaikutusten hillitsemisessä omaksumalla kestäviä kulutus-, ja hankintamalleja. Nämä perustuvat pidemmän elinkaaren ja korjaamisen suosimiseen, kunnostettujen laitteiden hankkimiseen ja yleisen kulutuksen vähentämiseen. Tavoitteen saavuttamiseksi kuluttajat tarvitsevat enemmän ja läpinäkyvämpää tietoa tuotteista, joita he aikovat hankkia ja käyttää. Mutta vaikka kuluttajilla olisikin tietoa ICT-laitteiden valmistuksen ja käytön negatiivisista vaikutuksista, sinnikäs markkinointi ja muut tekijät aiheuttavat tiedollista riitasointua.

Myös **valmistajien** on omilla toimillaan parannettava koko järjestelmän vastuullisuutta. Tähän tarvitaan myös ympäristömyötäisempää materiaalikehitystä ja tuotesuunnittelua, sillä 80 % tuotteen elinkaaren ympäristövaikutuksista määritellään suunnitteluvaiheessa. Suunnittelulla voidaan vaikuttaa raaka-aineiden kasvavaan määrään (sekä kokonaistuotanto että tarvittavien eri raaka-aineiden lukumäärä), elinkaarten pitenemiseen ja materiaalikiertojen sulkemiseen. Esimerkiksi suljetummat materiaalikierrot voidaan saavuttaa luopumalla asteittain komposiittimateriaaleista, seoksista ja vaarallisista aineista, jotta helpotetaan kierrättämistä. Materiaaleja, seoksia ja komponentteja on tärkeää ajatella myös korjattavuuden ja kierrätysmateriaalien käytön näkökulmasta. Lisäksi valmistajat voivat kehittää ja ylläpitää digitaalisia tuotepasseja, joilla tuotteita voidaan seurata koko niiden elinkaaren ajan ja jotka tarjoavat tärkeää tietoa kuluttajille, kierrätysyrityksille, sijoittajille ja muille sidosryhmille. Tuotepassit voivat myös tukea elinkaaren pidentämistä ja kierrätystä sisällyttämällä tietoa korjausvaihtoehdoista sekä tuomalla materiaalisisällön kierrättäjän tietoon. Kriittisten raaka-aineiden ja yhdisteiden **korvaaminen** voidaan nähdä suunnitteluratkaisuna, jolla vähennetään materiaalien kysyntää ja saantiriskiä.

Kaikki nämä muutokset kuitenkin tarvitsevat **julkista** tukea eli esim. tehokkaita kannustimia, sääntelyä ja tiedonjakoa. Tehokas poliittinen kehys saattaa ennen pitkää vaatia kokonaisvaltaisempaa järjestelmätason suunnittelua, joka ottaa huomioon potentiaaliset kerrannaisvaikutukset ja sektorirajat ylittävät vaikutukset, ja jolla tuetaan kestävämpää päätöksentekoa. Kun huomioidaan yhteiskunnan raaka-aineiden kokonaiskulutus ja sen vaikutukset, on selvää, että tarvitaan suuren mittakaavan järjestelmätason muutosta, joka huomioi kaikki asiaankuuluvat toimijat.



Lähde: SYKE, GTK. 2021. © SYKE. Kuvat: Adobe Stock.

Kuva 16. Esimerkkejä sähkölaitteiden kiertotalouteen ja vastuullisuuteen liittyvistä haasteista.

ICT-laitteiden resurssienkäyttöön liittyviä potentiaalisia ratkaisuja ovat (Kuva 16):

1. Ympäristömyötäinen suunnittelu materiaalien ja tuotteiden tasolla
2. Jäljitettävyyden sekä digitaalisten materiaali- ja tuotepassien kehittäminen
3. Kierrätyksen optimointi
4. Uusien kiertotalouden mukaisten jakamis- ja omistajuusmallien kehittely ja käyttöönotto
5. Kaivostoiminnan vastuullisuuden parantaminen EU:n raaka-aineomavaraisuuden lisäämiseksi
6. Kulutuksen vähentäminen kasvavan tietoisuuden, erilaisten kannustimien ja lainsäädännön kautta
7. Siirtymä materiaalien kulutuksesta ja tuotannosta palveluihin, kiertotalouden liiketoimintamallien käyttäminen, esim. tuote palveluna

Markkinoiden ja koko arvoketjun odotetaan siis siirtyvän kohti kestävämpiä toimintatapoja sen sijaan, että toiminta jatkuisi vanhaan tapaan. Niin kuluttajilla, teollisuudella, päätöksentekijöillä kuin sijoittajillakin on tärkeä roolinsa.

Jatkotutkimusaiheita

Tutkimuksen aikana tunnistettiin useita aiheita, joista tarvitaan lisää tietoa. Alla lueteltuja aiheita suositellaan jatkotutkimuksen aiheiksi:

- Muiden teollisuuden sektoreiden raaka-aineiden käyttö ja kysyntä osuuksittain
- Luotettava tieto ja ennusteet tulevaisuuden raaka-ainetarpeista
- Raaka-aineiden vastuullisen käytön taso
- Ovatko ICT:n muille sektoreille tarjoamat hyödyt ICT:n elinkaarivaikutuksia suurempia?
- Keskeisten digitaalisten teknologioiden (esim. IoT, 5G, virtuaaliteknologia (VR/AR)) raaka-ainetarpeet
- Digitalisaation vaatiman ICT-verkkoinfrastruktuurin raaka-ainetarpeiden kokoluokka - tämän tutkimuksen tapausesimerkit tarkastelivat loppukäyttäjätuotteita eli älypuhelinta ja älytelevisiota
- Älypuhelinten ja älytelevisioiden kierrätyksessä talteen saatavat ja menetettävät alkuaineet ja niiden määrät
- ICT-valmistusprosessien materiaalitehokkuus – esimerkiksi vain 1 % OLED-tuotannon käyttämistä jalometalleista päätyy lopulliseen OLED-tuotteeseen
- ICT-laitteiden ihanteellisten kierrätyspolkujen määrittely; talteenottoa ja ympäristövaikutuksia on optimoitava
- Monista materiaaleista koostuvien EoL-materiaalivirtojen koostumukset ja määrät

LÄHDE- JA KIRJALLISUUSLUETTELO

Adisorn, T., Tholen, L. & Götz, T. 2021. Towards a Digital Product Passport Fit for Contributing to a Circular Economy. Energies, 14, 2289. Saatavissa: https://doi.org/10.3390/en14082289

Akcil, A., Agcasulu, I. & Swain, B. 2019. Valorization of Waste LCD and Recovery of Critical Raw Material for Circular Economy: A Review. Resources, Conservation and Recycling 149 (November 2018), 622–37. doi: 10.1016/j.resconrec.2019.06.031

Andrews, T., Elizalde, B., Le Billon, P., Oh, C. H., Reyes, D. & Thomson, I. 2017. The Rise in conflict associated with mining operations: What lies beneath? Toronto: Cirdi. 126 s. Saatavissa: https://cirdi.ca/wp-content/uploads/2017/06/Conflict-Full-Layout-060817.pdf. [Viitattu 11.8.2021].

Apple 2021. Apple environmental progress report. Saatavissa: https://www.apple.com/environment/pdf/Apple_Environmental_Progress_Report_2021.pdf. [Viitattu 3.6.2021].

Arntz, M., Gregory, T. & Zierahn, U. 2016. The Risk of Automation for Jobs in OECD Countries: A Comparative Analysis, OECD Social, Employment and Migration Working Papers. OECD Publishing.

Badera, J. 2014. Problems of the social non-acceptance of mining projects with particular emphasis on the European Union – a literature review. Environment. & Socio-economic Studies, 2, 27–34. doi: 10.1515/environ-2015-0029

Bakker, C., Wang, F., Huisman, J. & Den Hollander, M. 2014. Products That Go Round: Exploring Product Life Extension through Design. Journal of Cleaner Production 69, 10–16. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.01.028

Bardsley Consulting, Navigant Consulting, SB Consulting & SSLS 2014. "Manufacturing Roadmap–Solid-State Lighting Research and Development." U.S. Department of Energy (September). Saatavissa: https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mfg_roadmap_aug2014.pd. [Viitattu 3.6.2021].

BEA 2019. Measuring the Digital Economy: An Update Incorporating Data from the 2018 Comprehensive Update of the Industry Economic Accounts, 1–12. Saatavissa: https://www.bea.gov/system/files/2019-04/digital-economy-report-update-april-2019_1.pdf. [Viitattu 4.6.2021].

Belkhir, L. & Elmeligi, A. 2018. Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. Journal of Cleaner Production 177, 448–463. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.239

Berwald, A., Clemm, C. & Prewitz, C. 2020. Environmental evaluation of current and future design rules. Deliverable 2.5 of PROMPT project. Saatavissa: https://prompt-project.eu/wp-content/uploads/2020/07/PROMPT_20200429_Environmental-Evaluation-of-Current-and-Future-Design-Rules.pdf. [Viitattu 19.5.2021].

Blanpain, B., Reuter, M. & Malfliet, A. 2019. Lead Metallurgy is Fundamental to the Circular Economy. Socrates Policy Brief. Saatavissa: https://kuleuven.sim2.be/wp-content/uploads/2019/02/SOCRATES-Policy-Brief-2019-Lead.pdf. [Viitattu 12.5.2021].

Blengini, G. A., Latunussa, C. E. L., Eynard, U., Torres de Matos, C., Wittmer, D., Georgitzikis, K., Pavel, C., Carrara, S., Mancini, L., Unguru, M., Blagoeva, D., Mathieux, F. & Pennington, D. 2020. Study on the EU's list of Critical Raw Materials, Final Report. 152 s. doi: 10.2873/11619

Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J., Mathieux, F. & Pavel, C. 2020. European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU – a foresight study. Publications Office of the European Union, 2020. 100 s. Saatavissa: https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42881. doi: 10.2873/58081. [Viitattu 19.5.2021].

Bonilla, S. H., Silva, H. R. O., da Silva, M. T., Gonçalves, R. F. & Sacomano, J. B. 2018. 'Industry 4.0 and Sustainability Implications: A Scenario-Based Analysis of the Impacts and Challenges'. Sustainability, 10, 3740. Saatavissa: https://doi.org/10.3390/su10103740

Bookhagen, B., Bastian, D., Buchholz, P., Faulstich, M., Opper, C., Irrgeher, J., Prohaska, T. & Koeberl, C. 2020. Metallic Resources in Smartphones. Resources Policy, 68, 101750. doi: 10.1016/j.resourpol.2020.101750

Brown, T. J., Idoine, N. E., Wrighton, C. E., Raycraft, E. R., Hobbs, S. F., Shaw, R. A., Everett, P., Deady, E. A. & Kresse, C. 2021. World mineral production 2015-2019. Nottingham: British Geological Survey. 89 s. Saatavissa: https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/download/world_statistics/2010s/WMP_2015_2019.pdf. [Viitattu 23.4.2021].

Buchert, M., Manhart, A., Bleher, D. & Pingel, D. 2012. Recycling Critical Raw Materials from Waste Electronic Equipment. Commissioned by the North Rhine-Westphalia State Agency for Nature, Environment and Consumer Protection Authors, 49, 30–40. Saatavissa: https://www.oeko.de/oekodoc/1375/2012-010-en.pdf. [Viitattu 19.5.2021].

Buchman, I. 2021. BU-205: Types of Lithium-ion. Battery University. Saatavissa: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion. [Viitattu 31.5.2021].

Bughin, J., Chui, M. & Manyika, J. 2010. Clouds, big data, and smart assets: Ten tech-enabled business trends to watch. McKinsey Q. Saatavissa: https://www.mckinsey.com/industries/technology-media-and-telecommunications/our-insights/clouds-big-data-and-smart-assets-ten-tech-enabled-business-trends-to-watch#. [Viitattu 3.6.2021].

Bukht, R. & Heeks, R. 2018. Defining, conceptualising and measuring the digital economy. Int. Organ. Res. J. 13, 143–172. Saatavissa: https://doi.org/10.17323/1996-7845-2018-02-07

Börjesson Rivera, M., Håkansson, C., Svenfelt, Å. & Finnveden, G. 2014. Including second order effects in environmental assessments of ICT. Environ. Model. Softw. 56, 105–115. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.02.005

Cenci, M. P., Scarazzato, T., Munchen, D. D., Dartora, P. C., Veit, H. M., Bernardes, A. M. & Dias, P. R. 2021. Eco-Friendly Electronics–A Comprehensive Review. Advanced Materials Technologies. Saatavissa: https://doi.org/10.1002/admt.202001263

CERA 2021. Certification of raw materials. Saatavissa: https://www.cera4in1.org/certification/system-and-standards. [Viitattu 3.5.2021].

Chancerel, P., Marwede, M., Nissen, N. F. & Lang, K. D. 2015. Estimating the Quantities of Critical Metals Embedded in ICT and Consumer Equipment. Resources, Conservation and Recycling 98, 9–18. doi: 10.1016/j.resconrec.2015.03.003

Ciacci, L., Werner, T. T., Vassura, I. & Passarini, F. 2019. 'Backlighting the European Indium Recycling Potentials'. Journal of Industrial Ecology, Vol. 23, No. 2, 2019, 426–437.

Cisco 2020. Cisco Annual Internet Report (2018-2023). Saatavissa: https://doi.org/10.1016/s1361-3723(20)30026-9

Cisco 2021. What Is a Data Center. Saatavissa: https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/data-center-virtualization/what-is-a-data-center.html. [Viitattu 3.1.2021].

Compound Interest 2014. The Chemical Elements of a Smartphone. Saatavissa: http://www.compoundchem.com/2014/02/19/the-chemical-elements-of-a-smartphone/. [Viitattu 21.1.2021].

Conde, M. 2017. Resistance to mining. A review. Ecological Economics 132, 80–90. doi: org/10.1016/j.ecolecon.2016.08.025

Cordella, M., Alfieri, F. & Sanfelix, J. 2021. Reducing the carbon footprint of ICT products through material efficiency strategies: A life cycle analysis of smartphones. J. Ind. Ecol. 1–17. Saatavissa: https://doi.org/10.1111/jiec.13119

De La Torre, E., Vargas, E., Ron, C. & Gámez, S. 2018. Europium, Yttrium, and Indium Recovery from Electronic Wastes. Metals 8(10). doi: 10.3390/met8100777

Dekoninck, E. A., Domingo, L., O'Hare, J. A., Pigosso, D., Reyes, T. & Troussier, N. 2016. Defining the challenges for ecodesign implementation in companies: Development and consolidation of a framework, Journal of Cleaner Production 135, 410-425.

Digital Europe 2019. A stronger digital Europe. Our call for action towards 2025. Brussels, Digital Europe. 50 s. Saatavissa: https://www.digitaleurope.org/wp/wp-content/uploads/2019/02/DIGITALEUROPE-%E2%80%93-Our-Call-to-Action-for-A-STRONGER-DIGITAL-EUROPE.pdf. [Viitattu 4.6.2021].

Digital TV Europe 2020. "Global Smart TV Sales to Increase 21% by 2024." Saatavissa: https://www.digitaltveurope.com/2020/02/20/global-smart-tv-sales-to-increase-21-by-2024/. [Viitattu 19.5.2021].

DSCC 2019. OLED Materials Market to Double in Four Years. Saatavissa: https://www.displaysupplychain.com/blog/oled-materials-market-to-double-in-four-years. [Viitattu 19.5.2021].

DSCC 2020. OLED Panel Revenues Will Grow to $51 Billion by 2025. Saatavissa: https://www.displaysupplychain.com/blog/oled-panel-revenues-will-grow-to-51-billion-by-2025. [Viitattu 19.5.2021].

EASAC 2016. Priorities for critical materials for a circular economy. EASAC Policy report 29. German National Academy of Sciences Leopoldina. Saatavissa: https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2017_01_EASAC_Critical_Materials.pdf. [Viitattu 18.5.2021].

Eerola, T. 2017. Corporate social responsibility in mineral exploration – The importance of communication and stakeholder engagement in earning and maintaining the social license to operate. Geologian tutkimuskeskus, Tutkimusraportti 233. 69 s. Saatavissa: http://tupa.gtk.fi/julkaisu/tutkimusraportti/tr_233.pdf

Eerola, T. 2021a. Finland. Julkaisussa: Lesser, P. (toim.) SLO good practices and recent disputes. Illustrative Examples Across Europe. Mining and Metallurgical Regions of Europe (MIREU) Project, Brussels, 17–42. Saatavissa: https://mireu.eu/sites/default/files/2021-06/Illustrative%20Examples%20Report.pdf. [Viitattu 31.7.2021].

Eerola, T. 2021b. New low impact mineral exploration technologies and the social license to explore. Insights from corporate websites in Finland. Cleaner Environmental Systems 3, 100059. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100059

Eilu, P., Bjerkgård, T., Franzson, H., Gautneb, H., Häkkinen, T., Jonsson, E., Keiding, J. K., Pokki, J., Raaness, A., Reginiussen, H., Róbertsdóttir, B. G., Rosa, D., Sadeghi, M., Sandstad, J. S., Stendal, H., Þórhallsson, E. R. & Törmänen T. 2021. The Nordic supply potential of critical metals and minerals for a Green Energy Transition. Nordic Innovation Report. 93 s. Saatavissa: https://norden.diva-portal.org/smash/get/diva2:1593571/FULLTEXT02

Eilu, P., Hallberg, A., Bergman, T., Bjerkgård, T., Feoktistov, V., Korsakova, M., Krasotkin, S., Lauri, L., Litvinenko, V., Philippov, N., Sandstad, J. S. & Shchiptsov, V. 2020. Fennoscandian Ore Deposit Database. Annual update (end-2019 data). Saatavissa: http://en.gtk.fi/informationservices/databases/fodd/index.html. [Viitattu 2.2.2021].

Elkington, J. 1997. Cannibals with forks. The triple bottom line of 21st Century business. Oxford: Capstone. 245 s.

Elsner, H. 2019. Noble gases – supply really critical? DERA Rohstoffinformationen 39. 164 s. Saatavissa: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-39_en.pdf?__blob=publicationFile&v=2. [Viitattu 3.2.2021].

Ercan, M., Malmodin, J., Bergmark, P., Kimfalk, E. & Nilsson, E. 2016. Life Cycle Assessment of a Smartphone. ICT for Sustainability 2016. doi: 10.2991/ict4s-16.2016.15

Ernst & Young Private Ltd 2020. Top 10 business risks and opportunities for mining and metals in 2021. Saatavissa: https://www.ey.com/en_gl/mining-metals/top-10-business-risks-and-opportunities-for-mining-and-metals-in-2021. [Viitattu 25.5.2021].

Ethical consumer 2019. "Mobile Phones." Saatavissa: https://www.ethicalconsumer.org/technology/shopping-guide/mobile-phones. [Viitattu 19.5.2021].

EU Science Hub 2020. CRM List 2020. Saatavissa: https://rmis.jrc.ec.europa.eu/?page=crm-list-2020-e294f6. [Viitattu 12.5.2021].

European Commission 2011. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. A renewed EU strategy 2011-14 for Corporate Social Responsibility. COM/2011/0681 final. Saatavissa: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52011-DC0681. [Viitattu 8.5.2021].

European Commission 2014. Ecodesign your future. 12 s.

European Commission 2020a. A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe. Brussels. Saatavissa: https://ec.europa.eu/environment/strategy/circular-economy-action-plan_fi. [Viitattu 8.5.2021].

European Commission 2020b. Combatting conflict minerals. Saatavissa: https://ec.europa.eu/trade/policy/in-focus/conflict-minerals-regulation/. [Viitattu 12.5.2021].

European Commission 2020c. Critical raw materials. Saatavissa: https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en. [Viitattu 27.5.2021].

European Commission 2020d. EU 'GPP criteria' -database. Saatavissa: https://ec.europa.eu/environment/gpp/eu_gpp_criteria_en.htm. [Viitattu 24.9.2021].

European Commission 2020e. Shaping Europe's Digital Future. COM(2020) 67 final. Saatavissa: https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/communication-shaping-europes-digital-future-feb2020_en_3.pdf. [Viitattu 12.5.2021].

European Commission 2020f. Results and deliverables of the environmental footprint pilot phase. Saatavissa: https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/PEF-CR_OEFSR_en.htm. [Viitattu 10.12.2020].

European Commission 2021a. EU green public procurement criteria for computers, monitors, tablets and smartphones. Commission staff working document SWD (2021) 57 Final. Saatavissa: https://ec.europa.eu/transparency/documents-register/detail?ref=SWD(2021)57&lang=en. [Viitattu 8.5.2021].

European Commission 2021b. Waste from Electronic and Electric Equipment. Saatavissa: https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/waste-electrical-and-electronic-equipment-weee_fi. [Viitattu 20.5.2021].

European Parliament 2008. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council on waste and repealing certain Directives. Saatavissa: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=EN. [Viitattu 3.6.2021].

European Parliament 2020. E-waste in the EU: facts and figures. Eur. Parliam. News. Saatavissa: https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20201208STO93325/e-waste-in-the-eu-facts-and-figures-infographic. [Viitattu 3.6.2021].

European Parliamentary Research Service 2019. Digital transformation. Saatavissa: https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/633171/EPRS_BRI(2019)633171_EN.pdf. [Viitattu 3.6.2021].

European Political Strategy Centre 2019. Rethinking Strategic Autonomy in the Digital Age. Saatavissa: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/889dd7b7-0cde-11ea-8c1f-01aa75ed71a1/language-en. [Viitattu 21.3.2021].

European Strategy and Policy Analysis System 2019. Global trends to 2030. Challenges and choices for Europe. ESPAS Report 2019. 43 s. Saatavissa: https://www.iss.europa.eu/content/global-trends-2030-%E2%80%93-challenges-and-choices-europe. [Viitattu 19.5.2021].

Eurostat 2021. ICT sector–value added, employment and R&D. Saatavissa: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/ICT_sector_-_value_added,_employment_and_R%26D#The_size_of_the_ICT_sector_as_measured_by_value_added. [Viitattu 3.1.2021].

Eynard, U., Georgitzikis, K., Wittmer, D., Latunussa, C. E. L., Torres de Matos, C., Mancini, L., Unguru, M., Blagoeva, D., Bobba, S., Pavel, C., Carrara, S., Mathieux, F., Pennington, D. & Blengini, G. A. 2020. European Commission, Study on the EU's list of Critical Raw Materials, Factsheets on Non-critical Raw Materials. 589 s. Saatavissa: https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRM_2020_Factsheets_non-critical_Final.pdf. doi: 10.2873/587825. [Viitattu 3.4.2021].

Fairphone 2017. Fairphone's report on recyclability. Does modularity contribute to better recovery of materials? Saatavissa: https://www.fairphone.com/wp-content/uploads/2017/02/FairphoneRecyclabilityReport022017.pdf. [Viitattu 24.6.2021].

Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R. & Bel, G. 2020. The Global E-waste Monitor 2020. Saatavissa: http://ewastemonitor.info/. [Viitattu 19.5.2021].

Frenzel, M., Mikolajczak, C., Reuter, M. A. & Gutzmer, J. 2017. Quantifying the relative availability of high-tech by-product metals – the cases of gallium, germanium and indium. Resources Policy 52, 327–335.

Gartner 2021. Gartner IT Glossary. Saatavissa: https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary. [Viitattu 19.5.2021].

Geologian tutkimuskeskus 2021. Mineral Deposit Database. Saatavissa: https://gtkdata.gtk.fi/mdae/index.html. [Viitattu 2.2.2021].

Goodland, R. 2012. Responsible mining: The key to profitable resource development. Sustainability 4, 2099-2016. Saatavissa: https://doi.org/10.3390/su4092099

Grand View Research 2017a. Smart TV Market Analysis Report. Saatavissa: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/smart-tv-industry. [Viitattu 19.5.2021].

Grand View Research 2017b. Smart TV Market Size to Reach 292.55 Billion by 2025. Saatavissa: https://www.grandviewresearch.com/press-release/global-smart-tv-market. [Viitattu 19.5.2021].

Guiltinan, J. 2009. Creative Destruction and Destructive Creations: Environmental Ethics and Planned Obsolescence. Journal of Business Ethics 89, 19–28. Saatavissa: https://doi.org/10.1007/s10551-008-9907-9

Gurita, N., Fröhling, M. & Bongaerts, J. 2018. Assessing Potentials for Mobile/Smartphone Reuse/Remanufacture and Recycling in Germany for a Closed Loop of Secondary Precious and Critical Metals. Journal of Remanufacturing 8(1–2), 0–22. doi: 10.1007/s13243-018-0042-1

Hanski, J., Ahonen, T., Uusitalo, T., Vainio, H. & Valkokari, P. 2018. Smart Asset Management: Stories from the World of Digital Services. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/335161420_Smart_Asset_Management_Stories_from_the_World_of_Digital_Services. [Viitattu 3.6.2021].

Herrington, R. 2021. Mining our green future. Nature Reviews Materials. doi: 10.1038/s41578-021-00325-9

Hiekkanen, K., Seppälä, T. & Ylhäinen, I. 2021. Energy and Electricity Consumption of the Information Economy Sector in Finland. Saatavissa: https://www.etla.fi/julkaisut/energy-and-electricity-consumption-of-the-information-economy-sector-in-finland/. [Viitattu 3.6.2021].

Hilson, G. 2012. Corporate social responsibility in the extractive industries: Experiences from developing countries. Resources Policy 37, 131–137.

Horn, S., Gunn, A. G., Petavratzi, E., Shaw, R. A., Eilu, P. Törmänen, T. Bjerkgård, T., Sandstad, J. S. Jonsson, E., Kountourelis, S. & Wall, F. 2021. Cobalt resources in Europe and the potential for new discoveries. Ore Geology Reviews 130, 1–25. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103915

Horn, S., Salo, H. & Nissinen, A. 2021. Ekodesign – tiekartta julkishallinnolle ja yrityksille. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 17/2021.

Horner, N. C., Shehabi, A. & Azevedo, I. L. 2016. Known unknowns: Indirect energy effects of information and communication technology. Environ. Res. Lett. Saatavissa: https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/10/103001

Huawei & Oxford Economics 2017. Digital Spillover–Measuring the true impact of the digital economy. Saatavissa: https://www.huawei.com/minisite/gci/en/digital-spillover/files/gci_digital_spillover.pdf. [Viitattu 3.6.2021].

Huisman, J., Leroy, P., Tertre, F., Söderman, M. L., Chancerel, P., Cassard, D., Amund, N., Wäger, P., Kushnir, D., Rotter, V.S., Mählitz, P., Herreras, L., Emmerich, J., Hallberg, A., Habib, H., Wagner, M. & Downes, S. 2017. ProSUM Project Urban mine and Mining wastes–Final report. Saatavissa: http://www.prosumproject.eu/sites/default/files/DIGITAL_Final_Report.pdf. [Viitattu 3.6.2021].

Hund, K., La Porta, D., Fabregas, T. P., Laing, T. & Drexhage, J. 2020. Minerals for Climate Action: The Mineral

Intensity of the Clean Energy Transition. International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. 110 s.

IDC 2021. IDC Forecasts Worldwide Market for Used Smartphones to Reach 351.6 Million Units with a Market Value of $65 Billion in 2024. Saatavissa: https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS47258521. [Viitattu 5.3.2021].

IEA 2020. Data Centres and Data Transmission Networks. Saatavissa: https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks. [Viitattu 3.1.2021].

IEA 2021. The role of critical minerals in clean energy transitions. Special Report of the World Energy Outlook (WEO) team of the IEA. Paris: IEA. 283 s. Saatavissa: https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions

ITU 2012. Toolkit on environmental sustainability for the ICT sector 314. Saatavissa: https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/4B/01/T4B010000060001PDFE.pdf. [Viitattu 3.6.2021].

Jain, R. K., Cui, Z. & Domen, J. K. 2016. Environmental impact of mining and mineral processing. Management, monitoring, and auditing strategies. Amsterdam: Elsevier. 307 s. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/C2014-0-05174-X

Jang, H. & Topal, E. 2020. Transformation of the Australian mining industry and future prospects. Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy 129, 120–134. Saatavissa: https://doi.org/10.1080/25726668.2020.1786298

Jowitt, S. M. & McNulty, B. A. 2021. Geology and mining: mineral resources and reserves: their estimation, use, and abuse. SEG Discovery 125, 27–36.

Jowitt, S., Mudd, G. & Thompson, J. 2020. Future availability of non-renewable metal resources and the influence of environmental, social, and governance conflicts on metal production. Communications Earth & Environment 1, 13. doi: 10.1038/s43247-020-0011-0

Judl, J., Horn, S., Pesu, J., Savolainen, H. & Kautto, P. 2020. ICT-päätelaitteisiin liittyvät materiaali-, energia- ja ilmastokysymykset. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/162378. [Viitattu 3.6.2021].

Judl, J., Tilkanen, J., Riddlestone, S. & Rubbens, C. 2018. Creating sustainable smartphones: Scaling up best practice to achieve SDG 12. Transform Together Report. Saatavissa: https://transform-together.weebly.com/uploads/7/9/7/3/79737982/report_-_creating-sustainable-smartphone_scaling-up-best-practice-to-achieve-sdg-12.pdf. [Viitattu 3.6.2021].

Jönbrink, A.-K. & Melin, H. E. 2008. How central authorities can support ecodesign. TemaNord 2008, 569.

Kellens, K., Baumers, M., Gutowski, T. G., Flanagan, W., Lifset, R. & Duflou, J. R. 2017. Environmental Dimensions of Additive Manufacturing: Mapping Application Domains and Their Environmental Implications. J. Ind. Ecol. 21, S49–S68. Saatavissa: https://doi.org/10.1111/jiec.12629

Kiiski Kataja, E. 2016. Megatrends 2016 – The future happens now. Memo 14.1.2016. Saatavissa: https://media.sitra.fi/2017/02/28142600/Megatrends_2016.pdf. [Viitattu 26.5.2021].

Kivinen, M. & Käpyaho, E. 2019. The European Union's minerals policy. Julkaisussa: Vasara, H. (toim.) State and outlook of the mining industry. Ministry of Economic Affairs and Employment of Finland. Mining Industry Sector Report 1/2018. 35 s. Saatavissa: https://tem.fi/documents/1410877/2851374/Sector+Reports+-+Mining+Sector/38402832-eeca-470a-aba4-a0fc-25ce35da/Sector+Reports+-+Mining+Sector.pdf. [Viitattu 3.6.2021].

Kivinen, S., Kotilainen, J. & Kumpula, T. 2020. Mining conflicts in the European Union: environmental and political perspectives. Fennia 198, 163–179. Saatavissa: https://doi.org/10.11143/fennia.87223

Kolb, J., Rosa, D., Thrane, K. & Keiding, J. K. 2016. Greenland. Julkaisussa: Boyd, R., Bjerkgård, T., Nordahl, B. & Schiellerup, H. (toim.) Mineral resources in the Arctic. Geol. Surv. Norway, Spec. Publ., 162–189.

Koppe, J. C. 2021. Lessons Learned from the Two Major Tailings Dam Accidents in Brazil. Mine Water and the Environment 40, 166–173. Saatavissa: https://doi.org/10.1007/s10230-020-00722-6

Kortelainen, H. & Hanski, J. *painossa.* Asset life cycle management for Smart Grids: Challenges and implications. International Journal of Strategic Engineering Asset Management.

Ku, A. Y. 2018. Anticipating critical materials implications from the Internet of Things (IOT): Potential stress on future supply chains from emerging data storage technologies. Sustain. Mater. Technol. 15, 27–32. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.10.001

Laine, J. 2015. Paremman palvelun nimissä – digitaalinen raaka-aine heti jaettavaksi! Talouselämä 24.08.2015. Saatavissa: https://www.talouselama.fi/kumppaniblogit/tiedon-blogi/paremman-palvelun-nimissa-digitaalinen-raaka-aine-heti-jaettavaksi/0765acd3-e960-3c31-9f83-7a763c1a79c5. [Viitattu 8.4.2021].

Latunussa, C. E. L., Georgitzikis, K., Torres de Matos, C., Grohol, M., Eynard, U., Wittmer, D., Mancini, L., Unguru, M., Pavel, C., Carrara, S., Mathieux, F., Pennington, D. & Blengini, G. A. 2020. European Commission, Study on the EU's list of Critical Raw Materials, Factsheets on Critical Raw Materials. 819 s. Saatavissa: https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRM_2020_Factsheets_critical_Final.pdf. doi: 10.2873/92480

Lee, E. B., Lee, S. G. & Yang, C. G. 2017. "The Influences of Advertisement Attitude and Brand Attitude on Purchase Intention of Smartphone Advertising." Industrial Management and Data Systems 117(6), 1011–36. doi: 10.1108/IMDS-06-2016-0229

Leroy, P. 2020. Issues of concern. Presentation at E-waste Forum 2020 at 18 November 2020. WEEEForum.

Lu, T. 2017. "Almost Half Of Smartphone Users Spend More Than 5 Hours A Day on Their Mobile Device." Counterpoint. Saatavissa: https://www.counterpointresearch.com/almost-half-of-smartphone-users-spend-more-than-5-hours-a-day-on-their-mobile-device/. [Viitattu 19.5.2021].

Lusty, P. A. & Gunn, A. G. 2016. Challenges to global mineral resource security and options for future supply. Geol. Soc. London Publ. 393, 265–276.

Luttropp, C. & Lagerstedt, J. 2006. EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. Journal of Cleaner Production, 14 (15–16), 1396–1408.

LVM 2021. ICT-alan ilmasto- ja ympäristöstrategia. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/162910. [Viitattu 19.5.2021].

Macro polo 2021. Big Picture: OLED Display. Saatavissa: https://macropolo.org/digital-projects/supply-chain/oled-display/. [Viitattu 19.5.2021].

Malmodin, J. & Lundén, D. 2018. The energy and carbon footprint of the global ICT and E & M sectors 2010–2015. Sustain. 10. Saatavissa: https://doi.org/10.3390/su10093027

Malmodin, J., Bergmark, P. & Matinfar, S. 2018. A high-level estimate of the material footprints of the ICT and the E&M sector. 5th International Conference

on Information and Communication Technology for Sustainability 52, 168–148. Saatavissa: https://doi.org/10.29007/q5fw

Mao, Y., Lai, Y., Luo, Y., Liu, S., Du, Y., Zhou, J., Ma, J., Bonaiuto, F. & Bonaiuto, M. 2020. Apple or Huawei: Understanding Flow, Brand Image, Brand Identity, Brand Personality and Purchase Intention of Smartphone" Sustainability 12(8), 3391. doi: 10.3390/su12083391

Marscheider-Weidemann, F., Langkau, S., Hummen, T., Erdmann, L. & Tercero Espinoza, L. 2016. Raw materials for emerging technologies. DERA Rohstoffinformationen 28, 1–16.

Martins, J., Costa, C., Oliveira, T., Gonçalves, R. & Branco, F. 2019. How Smartphone Advertising Influences Consumers' Purchase Intention. Journal of Business Research 94, 378–87. doi: 10.1016/j.jbusres.2017.12.047

Mathieux, F., Ardente, F., Bobba, S., Nuss, P., Blengini, G. A., Dias, P. A., Blagoeva, D., Torres De Matos, C., Wittmer, D., Pavel, C., Hamor, T., Saveyn, H., Gawlik, B., Orveillon, G., Huygens, D., Garbarino, E., Tzimas, E., Bouraoui, F. & Solar, S. 2017. Critical Raw Materials and the Circular Economy. Background report, Report EUR 28832 EN. Saatavissa: https://doi.org/10.2760/378123

Meinert, L. D., Robinson, G. R. & Nassar, N. T. 2016. Mineral resources: reserves, peak production and the future. Resources 5, 14. doi: 10.3390/resources5010014

Mercer-Mapstone, L., Rifkin, W., Louis, W. R. & Moffat, K. 2018. Company-community dialogue builds relationships, fairness, and trust leading to social acceptance of Australian mining developments. Journal of Cleaner Production 184, 671–677.

Messmann, L., Boldoczki, S., Thorenz, A. & Tuma, A. 2019. Potentials of preparation for reuse: A case study at collection points in the German state of Bavaria. J. Clean. Prod. 211, 1534–1546. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.264

Michaux, S. 2021. The mining of minerals and the limits to growth. Geologian tutkimuskeskus, Työraportti 16/2021. 68 s. Saatavissa: https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/16_2021.pdf

Millar, C., Lockett, M. & Ladd, T. 2017. Disruption: Technology, innovation and society. Technol. Forecast. Soc. Change. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.10.020

Minerals4EU 2021. Minerals Intelligence Network for Europe. Saatavissa: http://www.minerals4eu.eu/. [Viitattu 29.5.2021].

Ministry of the Environment Japan 2016. Introduction to Green Purchasing Legislation in Japan. Saatavissa: https://www.env.go.jp/policy/hozen/green/kokusai_platform/2015report/handbook_eng.pdf. [Viitattu 12.5.2021].

Mongardini, J. & Radzikowski, A. 2020. Global Smartphone Sales May Have Peaked: What Next? Saatavissa: https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2020/05/29/Global-Smartphones-Sales-May-Have-Peaked-49361. [Viitattu 19.5.2021].

Moon, C. J. & Evans, A. M. 2006. Ore, mineral economics and mineral exploration. Julkaisussa: Moon, C. J., Whateley, M. K. G. & Evans, A. M. (toim.) Introduction to mineral exploration. 2nd ed. Hong Kong: Blackwell Publishing, 3–18.

Mudd, G. M., Jowitt, S. M. & Werner, T. T. 2017. The world's by-product and critical metal resources part I: Uncertainties, current reporting practices, implications and grounds for optimism. Ore Geology Reviews 86, 924–938.

Mugge, R., Jockin, B. & Bocken, N. 2017. How to sell refurbished smartphones? An investigation of different customer groups and appropriate incentives. Journal of Cleaner Production 147, 284–296.

Muller, A. 2013. The Chemistry of the Mobile Phones. Saatavissa: https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2013/2013_026.pdf. [Viitattu 19.5.2021].

Nassar, N. T., Wilburn, D. R. & Goonan, T. G. 2016. By-product metal requirements for U.S. wind and solar photovoltaic electricity generation up to the year 2040 under various Clean Power Plan scenarios. Applied Energy 183, 1209–1226.

Natural Resource Governance Institute 2015. The resource curse. The political and economic challenges of natural resource wealth. NRGI Reader 2015. 6 s.

Nickel Institute 2021. Nickel recycling. Saatavissa: https://nickelinstitute.org/policy/nickel-life-cycle-management/nickel-recycling/. [Viitattu 2.2.2021].

Nilsson, N. 2010. The Quest for Artificial Intelligence: A History of Ideas and Achievements. Stanford University.

OECD 2011. Guide to Measuring the Information Society 2011. OECD Guide to Measuring the Information Society 2011. Saatavissa: https://doi.org/10.1787/9789264113541-en

Ojala, T., Mettälä, M., Heinonen, M. & Oksanen, P. 2020. The ICT sector, climate and the environment–interim report of the working group preparing a climate and environmental strategy for the ICT sector in Finland. Ministry of Transport and Communications. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/162473. [Viitattu 3.6.2021].

OMDIA 2020. Handset ODM Industry White Paper. Saatavissa: https://omdia.tech.informa.com/-/media/tech/omdia/whitepapers/handset-odm-industry-white-paper.pdf. [Viitattu 28.5.2021].

Pajarinen, M. & Rouvinen, P. 2014. Computerization Threatens One Third of Finnish Employment. ETLA Brief No 22. Saatavissa: http://pub.etla.fi/ETLA-Muistio-Brief-22.pdf. [Viitattu 3.6.2021].

Panasonic 2019. Recycling Processes. Saatavissa: https://panasonic.net/eco/petec/process/. [Viitattu 19.5.2021].

Prakash, S., Dehoust, G., Gsell, M., Schleicher, T. & Stamminger, R. 2016. Einfluss der Nutzungsdauer von Produkten auf ihre Umweltwirkung: Schaffung einer Informationsgrundlage und Entwicklung von Strategien gegen „Obsoleszenz". Saatavissa: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_11_2016_einfluss_der_nutzungsdauer_von_produkten_obsoleszenz.pdf. [Viitattu 19.5.2021].

Proske, M., Sanchez, D., Clemm, C. & Baur, S. J. 2020. Life Cycle Assessment of the Fairphone 3. Fraunhofer-Institut IZM. doi: 10.1109/EVER.2014.6844034

Provasnek, A., Sentic, A. & Schmid, E. 2017. Integrating Eco–Innovations and Stakeholder Engagement for Sustainable Development and a Social License to Operate. Corp. Soc. Responsib. Environ. Mgmt. 24, 173–185. doi: 10.1002/csr.1406

Puckett, J., Brandt, C. & Palmer, H. 2018. Holes in the Circular Economy: WEEE Leakage from Europe. A Report of the e-Trash Transparency Project. A Rep. e-Trash Transpar. Proj. 120. Saatavissa: http://wiki.ban.org/images/f/f4/Holes_in_the_Circular_Economy-_WEEE_Leakage_from_Europe.pdf. [Viitattu 19.5.2021].

Rasmussen, R. O. (toim.) 2011. Megatrends. TemaNord 2011, 527. Copenhagen: Nordic Council of Ministers. 205 s.

Reck, B. & Graedel, T. 2012. Challenges in Metal Recycling. Science 337(6095). Saatavissa: https://doi.org/10.1126/science.1217501

Reuter, M. & van Schaik, A. 2012. Opportunities and Limits of WEEE Recycling –Recommendations to Product Design from a Recyclers Perspective. Electronics Goes Green 2012+, ECG 2012 – Joint International Conference and Exhibition, Proceedings. IEEE.

Reuter, M., van Schaik, A. & Ballester, M. 2018. Limits of Circular Economy: Fairphone Modular Design Pushing the limits. World of Metallurgy – Erzmetall 71, 68–79.

Rizos, V., Bryhn, J., Alessi, M., Campmas, A. & Zarra, A. 2019. Identifying the Impact of the Circular Economy on the Fast-Moving Consumer Goods Industry: Opportunities and Challenges for Businesses, Workers and Consumers – Mobile Phones as an Example. Study. European Economic and Social Committee. Saatavissa: https://www.eesc.europa.eu/sites/default/files/files/qe-03-19-510-en-n.pdf. [Viitattu 19.5.2021].

Rossi, M., Germani, M. & Zamagni, A. 2016. Review of ecodesign methods and tools. Barriers and strategies for an effective implementation in industrial companies. Journal of Cleaner Production 129, 361-373.

Samsung 2011. Smart TV: Piece by Piece. Saatavissa: https://news.samsung.com/global/smart-tv-piece-by-piece. [Viitattu 19.5.2021].

Schwarz, T. E., Schopf, K. & Arnberger, A. 2017. Reducing Conflicts of Interest in Ecodesign: The Relation of Innovation Management and Ecodesign in the Automotive Sector. Julkaisussa: Matsumoto M., Masui, K., Fukushige. S. & Kondoh, S. (toim.) Sustainability through Innovation in Product Life Cycle Design. Eco-Production (Environmental Issues in Logistics and Manufacturing). Singapore: Springer, 33–45.

Shabrin, N., Khandaker, S., Bin, S., Kashem, A., Hie, C. K. & Susila, T. 2017. Factors Affecting Smartphone Purchase Decisions of Generation-Y. The Journal of Contemporary Issues in Business and Government 23(1), 47–65.

Silver Institute 2020. World Silver Survey 2020. 83 s. Saatavissa: https://www.silverinstitute.org/wp-content/uploads/2020/04/World-Silver-Survey-2020.pdf

Slack, K. 2012. Mission impossible? Adopting a CSR-based business model for extractive industries in developing countries. Resources Policy 37, 179–184. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2011.02.003

Statista 2021a. Global smart TV unit sales from 2018 to 2025. Saatavissa: https://www.statista.com/statistics/878372/smart-tv-unit-sales-worldwide/. [Viitattu 28.5.2021].

Statista 2021b. Smartphone sales worldwide 2007-2021. Saatavissa: https://www.statista.com/statistics/263437/global-smartphone-sales-to-end-users-since-2007/. [Viitattu 12.5.2021].

Stedman, A, Yunis, J. & Aliakbari, E. 2020. Fraser Institute Annual Survey of Mining Companies 2019. Fraser Institute. Saatavissa: https://www.fraserinstitute.org/categories/mining. [Viitattu 29.7.2021].

STEP 2014. Solving the E-Waste Problem (Step). White Paper. One Global Definition of E-waste. Step 3576. 13 s. Saatavissa: https://www.step-initiative.org/files/_documents/whitepapers/StEP_WP_One%20Global%20Definition%20of%20E-waste_20140603_amended.pdf. [Viitattu 3.6.2021].

Tab tv 2019. Where are Samsung TVs made. Saatavissa: https://en.tab-tv.com/?p=18624. [Viitattu 28.5.2021].

Technavio 2020. Smart TV Market by Distribution Channel and Geography–Forecast and Analysis 2020–2024. Saatavissa: https://www.technavio.com/report/smart-tv-market-industry-analysis. [Viitattu 19.5.2021].

Techwalla 2021. How Are TVs Made? Saatavissa: https://www.techwalla.com/articles/how-are-tvs-made. [Viitattu 19.5.2021].

Tercero, L. 2019. Report on the Future Use of Critical Raw Materials. SCRREEN Project D.2.3, 2019.

Thaler, R. H. & Sunstein, C. R. 2008. Improving decisions about health, wealth, and happiness. New Haven, CT: Yale University Press. 293 s.

Thomson, I. & Boutilier, R. G. 2011. The social license to operate. Julkaisussa: Darling, P. (toim.) SME Mining and Engineering Handbook. Society of Mining Metallurgy and Exploration. Littleton, 1779-1796.

Thomson, I. & Joyce, S. A. 1997. Mineral exploration and the challenge of community relations. On Common Ground Consultants Inc. Saatavissa: http://oncommonground.ca/wp-content/downloads/mineral.html. [Viitattu 3.6.2021].

Tilastokeskus 2020. ICT-sektori. Saatavissa: https://www.stat.fi/meta/kas/ict_sektori.html. [viitattu 8.4.2021].

Tilastokeskus 2021. Teollisuus. Saatavissa: https://www.stat.fi/tup/suoluk/suoluk_teollisuus.html. [Viitattu 28.5.2021].

Tsiropoulos, I., Tarvydas, D. & Lebedeva, N. 2018. Li-ion batteries for mobility and stationary storage applications. EUR 29440 EN. Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi: 10.2760/87175, JRC113360

Tukes 2021. Rikasteiden, metallien, mineraalien ja vuolukiven tuotantoluvut (tonnia/v). Saatavissa: https://tukes.fi/documents/5470659/6373016/Rikasteiden%2C+metallien%2C+mineraalien+-ja+vuolukiven+tuotanto+v.+2009-2018/10fa7584-cbd6-68c6-3af5-9f8e2259e57f/Rikasteiden%2C+metallien%2C+mineraalien+ja+vuolukiven+tuotanto+v.+2009-2018.pdf. [Viitattu 2.3.2021].

UNCTAD 2019. Digital economy report 2019. Saatavissa: https://unctad.org/system/files/official-document/der2019_en.pdf. [Viitattu 28.5.2021].

UNCTAD 2020. Digital economy growth and mineral resources. Implications for developing countries. UNCTAD Technical Notes on ICT for Development 16. 42 s. Saatavissa: https://unctad.org/system/files/official-document/tn_unctad_ict4d16_en.pdf. [Viitattu 18.6.2021].

UNEP 2013. Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Saatavissa: https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8423. [Viitattu 3.6.2021].

USGS 2021. Mineral commodity summaries 2021. U.S. Geological Survey. 204 s. Saatavissa: https://doi.org/10.3133/mcs2021

Vasara, H. 2018. State and outlook of the mining industry. Ministry of Economic Affairs and Employment of Finland. Mining Industry Sector Report 1/2018. 35 s. Saatavissa: https://tem.fi/documents/1410877/2851374/Sector+Reports+-+Mining+Sector/38402832-eeca-470a-aba4-a0fc25ce35da/Sector+Reports+-+Mining+Sector.pdf. [Viitattu 3.6.2021].

Watson, D., Gylling, A. C., Tojo, N., Throne-Holst, H., Bjørn Bauer, B. & Milios, L. 2017. Circular Business Models in the Mobile Phone Industry. TemaNord, 2017, 560. doi: 10.6027/TN2017-560

Werner, T. T., Mudd, G. M. & Jowitt, S. M. 2015. Indium: key issues in assessing mineral resources and long-term supply from recycling. Applied Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B) 124, 213–226.

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E. & Weidema, B. 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment. [verkkojulkaisu]. 21(9), 1218–1230. Saatavissa: http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8. [Viitattu 21.6.2021].

White House 2021. Building resilient supply chains, revitalizing American manufacturing, and fostering broad-based growth. 100-Day Reviews under Executive Order 14017. 250 s. Saatavissa: https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/06/100-day-supply-chain-review-report.pdf

Whitmore, A. 2006. The emperor's new clothes: Sustainable mining? Journal of Cleaner Production, 14, 309–314.

Wikipedia 2021. Smart TV. Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Smart_TV. [Viitattu 19.5. 2021].

Windsor, R. 2016. Digital assets: the raw materials of digital transformation. DAM News. Saatavissa: https://digitalassetmanagementnews.org/digital-asset-management-value-chains/digital-assets-the-raw-materials-of-digital-transformation/. [Viitattu 4.6. 2021].

World Economic Forum 2021. Global Battery Alliance. Saatavissa: https://www.weforum.org/global-battery-alliance. [Viitattu 25.5.2021].

Wäger, P., Hirschier, R. & Widmer, R. 2015. Advances in intelligent systems and computing, Julkaisussa: ICT Innovations for Sustainability. Saatavissa: https://doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7

Zhang, A., Moffat, K, Lacey, J., Wang, J., González, R., Uribe, K., Cui, L. & Dai, Y. 2015. Understanding the social licence to operate of mining at the national scale: a comparative study of Australia, China and Chile. Journal of Cleaner Production 108, 1063–1072. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.097

Zhang, M. 2020. Global demand for laptops gets pandemic push. Counterpoint. Saatavissa: https://www.counterpointresearch.com/laptop-demand-gets-pandemic-push/. [Viitattu 3.6.2021].

Zhou, B., Li, Z. & Chen, C. 2017. Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies. Minerals 7, 203. doi: 10.3390/min7110203

Lainsäädäntö:

Jätelaki 646/2011. Saatavissa: https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20110646

LIITE 1

Haastattelukysymykset:

1. Mistä ostajat (B2B, C2C) ovat kiinnostuneita älypuhelinta hankkiessaan?
   a. Suorituskyky, suunnittelu, tuotemerkki
   b. Valmistajien suhtautuminen vastuullisuuskysymyksiin
   c. Korjattavuus, ohjelmistotuki, kierrätettävyys, puhelin palveluna/vuokraus, kierrätetty materiaalisisältö, elinkaaren pituus
   d. Laitteen sisältämät raaka-aineet? Tai kuinka useasta raaka-aineesta laite koostuu, mistä ne on hankittu, konfliktimineraalit tai muut sosiaaliset/ympäristökysymykset
   e. Käytetyt/kunnostetut puhelimet
   f. Mikä näistä on tärkein?
   g. Lisäkysymys yrityksille, jotka myyvät kunnostettuja puhelimia: mistä vanhat puhelimet saadaan?
2. Osaavatko liikkeiden myyjät vastata näihin kysymyksiin, jos niitä esitetään? Saavatko myyjät näihin aiheisiin liittyvää koulutusta?
3. Kysyvätkö asiakkaat sinulta raaka-aineiden hankinnasta tai ympäristöaiheista käyttövaiheen aikana?
4. Kuinka pitkä käyttövaihe tavallisesti on? Ensimmäisessä vai seuraavissa käyttövaiheissa?
5. Onko vanhoilla laitteilla uudelleenmyyntiarvo, tai kysyvätkö ostajat, mikä laitteiden uudelleenmyyntiarvo on?
6. Mitkä ovat tärkeimpiä elinkaaren pituutta rajoittavia tekijöitä (esim. laitteiden vikaantuminen, ohjelmistotuen puute, komponenttien käyttöikä (esim. näytön/lasin rikkoutuminen, akku), trendit yms.)? Miten organisaatio voisi vaikuttaa näihin?
7. Mitä ehdotuksia sinulla on laitteiden elinkaaren pidentämiseksi (esim. politiikat, yritysten, tekniset, yhteiskunnalliset toimet)?
8. Voiko ympäristötietoisuudessa tunnistaa erilaisia asiakassegmenttejä?
9. Näetkö trendejä, jotka kertovat siitä, miltä sektori tulevaisuudessa näyttää?
10. Miten hyvin tunnet näihin arvoketjuihin liittyvät vastuullisuuskysymykset, esim. ihmisoikeudet, ympäristöjalanjäljet, laitteiden koostumuksen tai raaka-aineiden hankinnan?
11. Mitkä ovat mielestäsi kiireellisimmät ICT-laitteiden raaka-aineiden käyttöön liittyvät haasteet?
    a. primaariraaka-aineiden louhintaan liittyvät haasteet?
    b. kierrätykseen liittyvät haasteet?
    c. muut vastuullisuushaasteet (yhteiskunta ja ympäristö)?
    d. kuluttajien tapoihin liittyvät haasteet?
    e. kriittisten raaka-aineiden toimitusvarmuuteen liittyvät haasteet?
    f. sääntelyyn liittyvät haasteet?

Lisäksi B2B-puolelle:

1. Onko hankintapolitiikassanne kiertotalouteen (katso edellä) tai puhelinten ympäristövaikutuksiin liittyviä kriteereitä?
2. Jos työpuhelin menee rikki, vaihdetaanko se automaattisesti vai harkitaanko korjaamista? Milloin korjaamista harkitaan (rikkoutunut lasi, vanha akku, muu)?
3. Kuinka pitkään työntekijä yleensä käyttää puhelinta?
4. Voiko työntekijä halutessaan valita puhelimen, jonka ympäristövaikutukset ovat pienemmät, käytetyn/kunnostetun puhelimen tai muutoin kiertotalouden mukaisen tuotteen?
5. Käyvätkö matkapuhelinvalmistajat keskustelua tuotteidensa ympäristönäkökulmista?

Kaikki GTK:n julkaisut verkossa hakku.gtk.fi